

Національний університет «Одеська морська академія»

Міністерства освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

Бурмака Ігор Олексійович

УДК 656.61.052

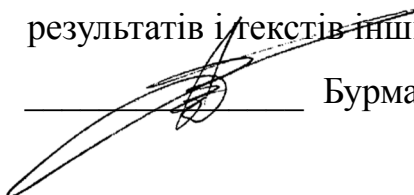
ДИСЕРТАЦІЯ

РОЗВИТОК ТЕОРІЇ І МЕТОДІВ ЗОВНІШНЬОГО УПРАВЛІННЯ СУДНАМИ В СИТУАЦІЇ НЕБЕЗПЕЧНОГО ЗБЛИЖЕННЯ

Спеціальність 05.22.13 - навігація та управління рухом

Подається на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук
(271 - Річковий та морський транспорт)

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

 Бурмака І.О.

Науковий консультант д. т. н., професор Цимбал М.М.

Одеса – 2020

АНОТАЦІЯ

Бурмака І.О. Розвиток теорії і методів зовнішнього управління суднами в ситуації небезпечного зближення. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису. Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.22.13 – навігація та управління рухом (271 - Річковий та морський транспорт). - Національний університет «Одеська морська академія», Одеса, 2020.

В результаті попереднього аналізу літературних джерел по проблемі забезпечення і підвищення безпеки судноводіння було встановлено, що основними напрямками рішення означеної проблеми являються забезпечення належного рівня точності визначення місця судна і розробка методів кількісної оцінки безпеки судноводіння в стислих умовах інтенсивного судноплавства, моделювання руху судна при плаванні в стислих районах, що пов'язано з питаннями виконання суднами різних маневрів, які сприяють більш ефективному і безпечному плаванню, та розробка теорії і методів попередження зіткнень суден при плаванні у прибережних районах.

Аналіз виявив, що одним з найбільш актуальних аспектів забезпечення безаварійності судноводіння є попередження зіткнень суден при плаванні в стислих водах, чим обумовлено вибір теми дисертаційного дослідження, яке присвячене розвитку принципу повного зовнішнього управління процесом розходження суден та розробці оперативних методів його реалізації.

В роботі сформульовані мета дисертаційного дослідження та його головна задача, причому головна задача розділена на декілька незалежних складових задач. Запропонована та підтверджена гіпотеза наукового дослідження, показано, що в результаті рішення незалежних складових задач одержано відповідні наукові результати дисертаційної роботи, які містять наукову новизну.

Практична цінність і значущість дисертаційної роботи обумовлені можливістю впровадження практичних рекомендацій, одержаних в дисертаційній роботі, які сприяють зниженню аварійності судноводіння. Сформульовано загальне наукове положення роботи, в якому концентровано викладено сенс дисертаційного дослідження.

В роботі викладена загальна методика пошуку рішення головної задачі шляхом знаходження рішень складових задач дисертаційної роботи, причому приведена методика в першу чергу відображає узагальнений алгоритм виконання дисертаційного дослідження поетапним рішенням складових задач, а не тільки їх формальним описом. З такою ціллю проведені теоретичні розробки, які використовують сучасні методи аналізу, та здійснено імітаційне моделювання для підтвердження коректності одержаних результатів дисертаційного дослідження.

Сформульовано принципи формування попередження зіткнення суден елементарної групи, в основі яких лежить принцип управління процесом розходження суден, способи оцінки небезпеки зближення і вибору маневру розходження і форма домену неприпустимих позицій. Досліджено взаємозв'язок параметрів істинного і відносного руху суден елементарної групи та проведено його аналіз. Отримано аналітичні вирази прямого та зворотного відображень простору відносного руху в простір істинного руху. Проведено аналітичний опис ситуації небезпечного зближення суден елементарної групи, що дозволяє виявити появу ситуаційного збурення і оцінити його інтенсивність.

Показана можливість формування трьох типів областей: область неприпустимих значень курсів елементарної групи суден, область неприпустимих значень швидкостей елементарної групи суден, область неприпустимих значень курсів одного судна і швидкостей іншого судна.

В подальшому проведено аналітичний опис системи попередження зіткнення суден, в якій використовується домен круглої форми. Отримано аналітичні вирази меж трьох типів областей неприпустимих параметрів. Наведено

метод формування області неприпустимих значень курсів елементарної групи суден, який враховує співвідношення швидкостей суден групи. Отримано спосіб розрахунку меж області неприпустимих значень швидкостей елементарної групи суден і запропоновано аналітичний спосіб розрахунку оптимального маневру розходження, а також розроблені два способи використання комп'ютерних процедур для цієї мети. Запропоновано спосіб формування і застосування області неприпустимих значень курсів одного судна і швидкостей другого судна, для якого суттєво співвідношення швидкостей суден, що зближаються. Розроблено комп'ютерні процедури формування та графічного відображення всіх типів областей, показано їх використання для вибору безпечної стратегії розходження зміною параметрів руху обох суден.

Досліджені питання урахування динаміки суден і навігаційних небезпек при формуванні областей неприпустимих значень параметрів руху і розрахунку їх меж. Запропоновано процедуру формування області неприпустимих значень курсів суден елементарної групи з урахуванням їх інерційності при зміні курсів. Показано застосування різних динамічних моделей обертального руху судна і їх вплив на безпеку розходження. Розглянуто спосіб уточненого формування меж областей неприпустимих значень параметрів руху суден елементарної групи при зміні швидкості з урахуванням їх інерційно-гальмівних характеристик. Наведено спосіб розрахунку меж нового типу області неприпустимих значень швидкостей суден елементарної групи, що дозволяє зробити оперативний вибір оптимального маневру розходження зниженням швидкостей суден. Отримано метод урахування навігаційних небезпек при виборі маневру розходження за допомогою областей неприпустимих значень параметрів руху суден, що передбачає зміну курсу одного або обох суден. Розглянуто особливості методу в залежності від типу навігаційної небезпеки. Розроблено процедури врахування точкової, лінійної і складної розподіленої навігаційної небезпеки.

В роботі розглянуто ситуації небезпечного зближення групи суден, числом більше двох, і способи вибору безпечного маневру розходження в таких

ситуаціях. Запропоновано процедуру урахування третього судна при виборі безпечного спільного маневру розходження зміною курсу і швидкості пари суден, причому розглянуто як активне, так і пасивне гальмування судна, що знижує швидкість. Показана комп'ютерна реалізація запропонованої процедури. Розроблено спосіб вибору маневру розходження трьох суден за допомогою спільного застосування області неприпустимих значень курсів суден групи. Досліджено питання визначення оптимального вектору зовнішнього керування групою суден, що небезпечно зближаються шляхом мінімальної зміни їх курсів прямування. Показано можливості комп'ютерної реалізації методу. Тому розроблена процедура вибору оптимального вектору керування за допомогою комп'ютерного сканування небезпечних областей парних маневрів, а також запропоновано реалізацію графічного способу визначення оптимального маневру розходження групи суден за допомогою комп'ютерного моделювання.

В роботі досліджено попередження зіткнення суден, домени яких мають еліптичну, прямокутну і складну форми, та отримано аналітичні вирази для залежності гранично - допустимої дистанції зближення від параметрів ситуації зближення і форми безпечного домену. Наведено чисельні приклади залежності для різних форм домену. Розроблено процедуру формування області неприпустимих значень параметрів руху суден і попередження зіткнення суден з використанням доменів еліптичної і складної форми. Показано, що для даних форм домену процедури можуть бути аналогічними. Запропоновано спосіб розрахунку попередження зіткнення суден, межі області неприпустимих значень курсів суден при використанні прямокутного домену. Наведено чисельні приклади формування областей для різних ситуацій небезпечного зближення з урахуванням співвідношення швидкостей суден елементарної групи.

У завершення роботи представлені результати перевірки коректності одержаних результатів дисертаційної роботи, для чого була розроблена імітаційна комп'ютерна програма, яка складається з двох основних модулів, що за-

безпечують вибір маневру розходження одним із розроблених методів для заданої ситуації небезпечного зближення і програвання вибраного маневру розходження, внаслідок чого робиться висновок про його коректність.

Наукова новизна отриманих в дисертації результатів полягає в розробці аналітичних методів розрахунку попередження зіткнення суден, реалізація яких передбачена в комп'ютерній навігаційній системі підтримці рішень, які відрізняються використанням принципу зовнішнього управління процесом розходження суден і застосуванням методів визначення його оптимальної стратегії з використанням областей неприпустимих значень параметрів руху суден, що ураховують форму безпечного домену судна.

У дисертаційній роботі:

Вперше:

- започатковано принцип зовнішнього управління процесом розходження суден, застосування якого передбачено в СУРС, чим може бути значно підвищена ефективність та безпека стратегії розходження;

- запропоновано і розроблено методи аналітичного розрахунку стратегії попередження зіткнення суден при зовнішньому управлінні, які поділяються на стандартні та нестандартні, що забезпечує можливість визначення маневру розходження в залежності від форми безпечного домену судна;

- розроблено групу методів для формування областей неприпустимих значень параметрів руху суден при зовнішньому управлінні їх процесом розходження, за допомогою графічного відображення яких визначаються стратегії розходження, що забезпечує оперативність і коректність прийняття рішення по запобіганню небезпечних зближень суден;

- розроблено метод визначення оптимального вектору зовнішнього управління групою суден, що небезпечно зближаються, яким досягається безпечне розходження зміною курсів мінімальної кількості суден групи;

- для зовнішнього управління процесом розходження суден сформовано загальний метод врахування їх динаміки і навігаційних перешкод при визна-

ченні меж областей неприпустимих значень їх параметрів руху, який передбачає використання різних моделей обертального руху суден та їх гальмування, що забезпечує коректність використання одержаних результатів при розходженні суден в стислих районах плавання.

Одержали подальший розвиток методи урахування третього судна, яке заважає, при визначенні параметрів маневру розходження суден елементарної групи за рахунок використання принципу зовнішнього управління процесом розходження суден за допомогою областей неприпустимих значень параметрів їх руху.

Проведеному дисертаційному дослідженню властиве практичне значення, яке полягає у тому, що його результати можуть бути упроваджені на судна в процесі експлуатації, а також використані розробниками навігаційних інформаційних систем, призначених для зовнішнього управління процесом розходження судна, та розробниками сучасних навігаційних тренажерів.

Практичні результати дисертаційного дослідження впроваджені компанією «СМА Шипс Україна» для навчання, підготовки і перепідготовки офіцерів морських суден по напрямку «Судноводіння» з метою забезпечення безпеки плавання (акт впровадження від 05.03.2020 р.), Херсонською державною морською академією (акт про впровадження від 27.05.2020 р.) для підготовки курсантів та студентів, приватним вищим навчальним закладом «Інститут післядипломної освіти» «Одеський морський тренажерний центр» для підготовки судноводіїв (акт упровадження від 17.06.2020 р.), Дунайським інститутом Національного університету «Одеська морська академія» (акт про впровадження від 01.09.2020 р.) та філією «Дельта-лоцман» Державного підприємства «Адміністрація морських портів України» для забезпечення безпеки мореплавства (акт впровадження від 14.09.2020 р.). Матеріали дисертаційного дослідження використовуються в навчальному процесі Національного університету «Одеська морська академія» при викладанні дисципліни «Управління судном» (акт про впровадження від 03.06.2020 р.), в рамках держбюджетних нау-

ково-дослідних робіт Національного університету «Одеська морська академія»: «Забезпечення безпеки судноводіння в стислих районах» (№ ДР 0115U003580, 2018 р.) та «Удосконалення методів безпечного управління судном» (№ ДР 0117U005133, 2020 р.) у яких автор дисертації брав участь як виконавець у першій ДР та керівник у другій ДР.

Під час виконання дисертаційної роботи наступні патенти були отримані:

- патент на корисну модель № 134690 «Пристрій для забезпечення високоточного безаварійного розходження суден». Дата публікації відомостей про видачу патенту та номер бюлетеня 27.05.2019, Бюл. №10;

- патент на корисну модель № 134691 «Пристрій для визначення високоточних параметрів маневру розходження суден при їх зовнішньому управлінні». Дата публікації відомостей про видачу патенту та номер бюлетеня 27.05.2019, Бюл. №10.

Ключові слова: безпека судноводіння, попередження зіткнень суден, зовнішнє управління, аналітичні методи попередження зіткнення суден, маневри розходження суден спільною зміною їх параметрів руху, області неприпустимих параметрів.

Основні результати дисертаційного дослідження здобувача опубліковані в наступних наукових працях:

СПИСОК ОСНОВНИХ ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Цымбал Н.Н. Гибкие стратегии расхождения судов / Цымбал Н.Н., Бурмака И.А., Тюпиков Е.Е. – Одесса: КП ОГТ, 2007. – 424 с.

2. Бурмака И.А. Теория и методы внешнего оптимального управления судов в ситуации опасного сближения: монография / И.А. Бурмака – Одесса: НУ «ОМА», 2019 – 284 с.

3. Бурмака И.А. Расчет характеристик поворотливости судна по экспериментальным данным / Бурмака И.А. // Судовождение / ОНМА. Вип. 9 – Одесса: Фенікс, 2005. – С. 7 – 13; **база(и) Google Академія**.

4. Бурмака И.А. Результаты имитационного моделирования процесса расхождения судов с учетом их динамики / Бурмака И.А. // Судовождение / ОНМА. Вип. 10 – Одесса: Фенікс, 2005. – С. 21 – 25; **база(и) Google Академія**.

5. Бурмака И.А. Поликритериальное управление процессом судовождения / Бурмака И.А., Дудник С.А. // Судноводіння: Зб. наук. праць / ОНМА. – Вип. 12. – Одеса: «ВидавІнформ», 2006. – С. 26 – 30; **база(и) Google Академія**.

6. Бурмака И.А. Принцип внешнего управления процессом судовождения в стесненных условиях / Бурмака И.А. // Судовождение: Зб. наук. праць / ОНМА. Вип. 13. – Одеса: «ВидавІнформ», – 2007. – С. 28 – 32; **база(и) Google Академія**.

7. Стебновский О.В. Особенности управления судами в стесненных водах / Стебновский О.В., Бурмака И.А. // Судноводіння: Зб. наук. праць / ОНМА, Вип. 16. – Одесса: «ВидавІнформ», 2009. – С. 157 – 161; **база(и) Google Академія**.

8. Стебновский О.В. Экспериментальные данные по поворотливости судна / Стебновский О.В., Бурмака И.А. // Судноводіння: Зб. наук. праць / ОНМА, Вип. 17. – Одесса: «ВидавІнформ», 2009. – С. 205 – 208; **база(и) Google Академія**.

9. Стебновский О.В. Расчет координат начала поворота судна из одного участка программной траектории на другой / Стебновский О.В., Бурмака И.А. // Судноводіння: Зб. наук. праць / ОНМА, Вип. 18. – Одесса: «ВидавІнформ», 2010. – С. 171 – 178; **база(и) Google Академія**.

10. Бурмака И.А. Определение параметров динамической модели поворотливости судна по натурным наблюдениям / Бурмака И.А., Бурмака А.И. //

Судноводіння: Зб. наук. праць / ОНМА, Вип. 19. – Одесса: «ВидавІнформ», 2010 – С. 24 – 27; **база(и)** *Google Академія*.

11. Бурмака И.А. Учет инерционности судна при решении задач в ситуационно - технической системе предупреждения столкновений судов // Бурмака И.А. // Проблемы техніки: науково-виробничий журнал. – 2013. - №1. – С. 45-54; **база(и)** *Google Академія*.

12. Бурмака И.А. Взаимодействие судов с компенсацией ситуационного возмущения / Бурмака И.А., Калиниченко Г.Е. // Проблемы техніки: науково-виробничий журнал. – 2014. № 1. – С. 89 – 93 **база(и)** *Google Академія*.

13. Бурмака И.А. Учет динамики судна при плавании в стесненных водах / Бурмака И.А., Калиниченко Г.Е., Сааков В.А. // Проблемы техніки: науково-виробничий журнал. – 2014. № 4. – С. 48 – 54; **база(и)** *Google Академія*.

14. Бурмака И.А. Определение области курсов двух судов, обеспечивающих безопасное расхождение/ Бурмака И.А, Булгаков А.Ю. // Эксплуатация, безопасность и экономика водного транспорта. Вестник Государственного морского университета им. адмирала Ф. Ф. Ушакова. Новороссийск. – 2014. – выпуск 2 (7). – С. 17 – 20; **база(и)** *РИНЦ*.

15. Бурмака И.А. Управление группы судов в ситуации опасного сближения / Бурмака И.А., Булгаков А.Ю. // Вестник Государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. Санкт-Петербург. – 2014. – выпуск 6 (28). – С. 9 – 13; **база(и)** *Google scholar, РИНЦ, Ulrichsweb, Crossref*.

16. Бурмака И.А. Маневр расхождения трех судов изменением курсов / Бурмака И.А., Булгаков А.Ю. // Автоматизация судовых технических средств: науч.-техн. сб. – 2014. – Вып. 20. Одесса: ОНМА. – С. 18 – 23; **база(и)** *Index Copernicus*.

17. Бурмака И.А. Зависимость точности обсервации от существенных факторов / Бурмака И.А., Алексейчук Б.М. // Водный транспорт: Сб. научн. трудов, Вып. 2(20). – К.: КДАВТ, 2014 – С. 18 – 23; **база(и)** *Index Copernicus*.

18. Бурмака И.А. Управление парой судов в ситуации опасного сближения / Бурмака И.А., Калиниченко Г.Е., Кулаков М.А. // Вестник Государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. Санкт-Петербург. – 2016. – Выпуск 3 (37). – С. 64 – 71; **база(и)** *Google scholar, РИНЦ, Ulrichsweb, Crossref*.

19. Бурмака И.А. Оценка эффективности обсервованных координат судна при избыточных измерениях / Бурмака И.А., Астайкин Д.В., Алексейчук Б.М. // Вестник Государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. Санкт-Петербург. – 2016. – Выпуск 1 (35). – С. 24 – 29; **база(и)** *Google scholar, РИНЦ, Ulrichsweb, Crossref*.

20. Y. Kalinichenko. Analysis of mathematical models of changing the vessel's course when turning / Y. Kalinichenko, I. Burmaka // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2016. – 6/9 (84). – P. 20 – 31; **база(и)** *Scopus*

21. Бурмака И.А. Использование областей опасных курсов и опасных скоростей для выбора маневра расхождения/ Бурмака И.А., Пасечнюк С.С., Кулаков М.А. // Эксплуатация морского транспорта. Государственный морской университет им. адмирала Ф. Ф. Ушакова. Новороссийск. – 2017. – выпуск 2 (83). – С. 76 – 81; **база(и)** *РИНЦ*.

22. Бурмака И.А. Методы внешнего управления судами в ситуации опасного сближения / Бурмака И.А., Кулаков М.А., Калиниченко Г.Е.// Науковий вісник Херсонської державної морської академії. – 2017. – № 2(17). – С. 4 – 14; **база(и)** *Google Академія*.

23. Бурмака И.А. Использование регрессионного анализа для обработки данных поворотливости судна / Бурмака И.А., Худенко Н.П. // Вісник ОНМУ: Зб. наук. праць ОНМУ, - 2014. - Вып. 1(40). – С. 83 – 88; **база(и)** *Google Scholar, Index Copernicus; CrossRef; Національна бібліотека України імені В.І. Вернадського*.

ПРАЦІ, ЯКІ ЗАСВІДЧУЮТЬ АПРОБАЦІЮ МАТЕРІАЛІВ ДИСЕРТАЦІЇ І ДОДАТКОВО ВІДОБРАЖАЮТЬ ОСНОВНІ НАУКОВІ РЕЗУЛЬТАТИ ДИСЕРТАЦІЇ

24. Бурмака И.А. Экстренная стратегия расхождения при чрезмерном сближении судов / И.А. Бурмака, А.И. Бурмака, Р.Ю. Бужбецкий – LAP LAMBERT Academic Publishing, 2014. – 202 с.

25. Пятаков Э.Н. Взаимодействие судов при расхождении для предупреждения столкновения / Э.Н. Пятаков, Р.Ю. Бужбецкий, И.А. Бурмака, А.Ю. Булгаков – Херсон: Гринь Д.С., 2015. – 312 с.

26. Бурмака И.А. Управление судами в ситуации опасного сближения / И.А. Бурмака., Э.Н. Пятаков., А.Ю. Булгаков - LAP LAMBERT Academic Publishing, - Саарбрюккен (Германия), – 2016. – 585 с.

27. Бурмака И.А. Оценка момента времени попадания судна в ситуацию чрезмерного сближения / Бурмака И.А., Сафин И.В., Бурмака А.И. // Проблеми техніки: науково-виробничий журнал. – 2014. № 4. – С. 108 - 118; **база(и) Google Академія.**

28. Бурмака И.А. Выбор оптимального вектора управления судами изменением курсов для безопасного расхождения / Бурмака И.А., Булгаков А.Ю. // Автоматизация судовых технических средств: науч.-техн. сб. – 2015. – № 21 – С. 29 – 33; **база(и) Index Copernicus.**

29. Бурмака И.А. Определение эффективности обсервованных координат судна при избыточных измерениях / Бурмака И.А., Астайкин Д.В., Алексейчук Б.М. // Судноводіння: Зб. наук. праць / ОНМА, Вип. 26. – Одесса: «ВидавІнформ», 2016 – С. 28 – 34; **база(и) Google Академія.**

30. Бурмака И.А. Основные характеристики группы судов при внешнем управлении процессом судовождения / Бурмака И.А., Калиниченко Г.Е., Кулаков М.А. // Судноводіння: Зб. наук. праць / ОНМА, Вип. 26. – Одесса: «ВидавІнформ», 2015 – С. 35 – 40; **база(и) Google Академія.**

31. Бурмака И.А. Выбор безопасного курса судна с учетом его инерционности при использовании областей опасных курсов / Бурмака И.А. // Автоматизация судовых технических средств: науч.-техн. сб. – 2016. – № 22. – С. 17 – 21; **база(и)** *Index Copernicus*.

32. Бурмака И.А. Условие существования множества маневров расхождения судов изменением скоростей/ Бурмака И.А. // Судноводіння: Зб. наук. праць / ОНМА, Вип. 27. – Одесса: «ВидавІнформ», 2017. – С. 32 – 37; **база(и)** *Google Академія*.

33. Бурмака И.А. Предупреждение столкновений судов методами внешнего управления процессом расхождения / Бурмака И.А., Калиниченко Г.Е., Кулаков М.А. // Science and Education a New Dimension. Natural and Technical Sciences, V (14), Issue: 132, 2017. - С. 56 - 60; **база(и)** *Index Copernicus: ICV 2014: 70.95; ICV 2015: 80.87; ICV 2016: 73.35; ICV 2018: 90.25, ICV 2019: 89.50; Google Scholar; Ulrichs Web Global Serials Directory; Union of International Associations Yearbook; Scribd; Academia.edu*.

34. Бурмака И.А. Применение областей недопустимых значений параметров для предупреждения столкновений судов при их внешнем управлении / Бурмака И.А., Кулаков М.А., Пасечнюк С.С. // East European Scientific Journal, №11 (27), 2017, part 1. – С. 40 – 48; **база(и)** *Index Copernicus; Academic Resource Index; International Scientific Indexing; Cosmos Impact Factor*.

35. Бурмака И. А. Оптимальный маневр расхождения судов изменением их скоростей / Бурмака И. А. // XXVII Международная конференция «Развитие науки в XXI веке», 15 сентября 2017г. – Харьков – С. 24 – 27.

36. Бурмака И.А. Формализация области опасных курсов и скоростей судов при внешнем управлении их процессом расхождения / Бурмака И.А., Пасечнюк С.С. // Судовождение: Зб. наук. праць / НУ «ОМА». - Вип. 28. – Одесса: «ВидавІнформ», 2018. – С. 16 – 24; **база(и)** *Google Академія*.

37. Бурмака И.А. Способ аналитического расчета оптимального маневра расхождения пары судов изменением скоростей / Бурмака И.А. // Автомати-

зация судовых технических средств: науч.-техн. сб. – 2017. – № 23. – С. 9 – 14; **база(и)** *Index Copernicus*.

38. Бурмака И.А. Выбор стратегии расхождения группы судов методами внешнего управления/ Бурмака И.А. // *Science and Education a New Dimension. Natural and Technical Sciences*, V (16), Issue: 148, 2017. - С. 66 – 71; **база(и)** *Index Copernicus*: *ICV 2014*: 70.95; *ICV 2015*: 80.87; *ICV 2016*: 73.35; *ICV 2018*: 90.25, *ICV 2019*: 89.50; *Google Scholar*; *Ulrichs Web Global Serials Directory*; *Union of International Associations Yearbook*; *Scribd*; *Academia.edu*

39. Бурмака И.А. Применение областей недопустимых значений параметров движения судов для безопасного расхождения / Бурмака И.А., Пятаков Э.Н. // *Austria - science*, Issue: 11, 2018. – С. 34 – 39; **база(и)** *Google Scholar*, *Academic Resource Index*; *Global Impact Factor*, *International Scientific Indexing*; *The Asian Education Index*; *CiteFactor (Academic Scientific Journals)*.

40. Бурмака И.А. Выбор совместной стратегии расхождения судов изменением параметров движения при их внешнем управлении / И.А. Бурмака, С.С. Пасечнюк // *Science and Education a New Dimension. Natural and Technical Sciences*, VI (18), Issue: 158, 2018. – С. 41 – 46; **база(и)** *Index Copernicus*: *ICV 2014*: 70.95; *ICV 2015*: 80.87; *ICV 2016*: 73.35; *ICV 2018*: 90.25, *ICV 2019*: 89.50; *Google Scholar*; *Ulrichs Web Global Serials Directory*; *Union of International Associations Yearbook*; *Scribd*; *Academia.edu*

41. Бурмака И.А. Учет инерционно-тормозных характеристик при выборе маневра расхождения изменением скоростей судов / Бурмака И.А. // *Austria - science*, Issue: 16, 2018. – С. 34 – 38; **база(и)** *Google Scholar*, *Academic Resource Index*; *Global Impact Factor*, *International Scientific Indexing*; *The Asian Education Index*; *CiteFactor (Academic Scientific Journals)*.

42. Бурмака И.А. Применение области недопустимых значений параметров движения судов для безопасного расхождения при наличии мешающего судна / Бурмака И.А. // *Science and Education a New Dimension. Natural and Technical Sciences*, VI (22), Issue: 186, 2018. - С. 53 – 58 **база(и)** *Index Coperni-*

cus: ICV 2014: 70.95; ICV 2015: 80.87; ICV 2016: 73.35; ICV 2018: 90.25, ICV 2019: 89.50; Google Scholar; Ulrichs Web Global Serials Directory; Union of International Associations Yearbook; Scribd; Academia.edu

43. Бурмака И.А. Маневр последовательного расхождения с двумя целями изменением курса и пассивным торможением / Бурмака И.А., Пятаков Э.Н. // *East European Scientific Journal*, № 5 (33), 2018, part 1. – С. 19 – 25; **база(и)** *Index Copernicus; Academic Resource Index; International Scientific Indexing; Cosmos Impact Factor*.

44. Бурмака И.А. Определение предельно-допустимой дистанции сближения при эллиптической форме судового домена / Бурмака И.А. // *Austria - science*, Issue: 23, 2019. – С. 36 – 43; **база(и)** *Google Scholar, Academic Resource Index; Global Impact Factor, International Scientific Indexing; The Asian Education Index; CiteFactor (Academic Scientific Journals)*.

45. Singh B., Burmaka I. Use of an electronic chart for choosing an effective maneuver for a vessel to pass at a safe distance among several targets // *Sailor Today*, Oct. 2018. – P. 41 – 42.

46. Бурмака И.А. Выбор оптимальной стратегии расхождения группы судов / Бурмака И.А. // *Судноплавство: перевезення, технічні засоби, безпека: Матеріали наук.-техн. конф., 19-20 листоп. 2013* – Одеса: ОНМА, 2014. – С. 83 – 85.

47. Бурмака И.А. Характеристики безопасности системы взаимодействия судов / Бурмака И.А. // *Эффективная и безопасная эксплуатация морских судов и сооружений: Материалы VI Всеукраинской научно-технической конференции, 2-4 октября 2013 г. - Севастополь: СевНТУ, 2013.* – С. 133 – 136.

48. Бурмака И.А. Маневр расхождения нескольких судов изменением курсов / Бурмака И.А., Булгаков А.Ю. // *Морські перевезення та інформаційні технології в судноплавстві: Матеріали наук.-техн. конф., 18-19 листоп. 2014* – Одеса: ОНМА, 2014. – С. 108 – 111.

49. Бурмака И.А. Маневрирование судна при плавании в стесненных условиях / Бурмака И.А., Сааков В.А., Калиниченко Г.Е. // Морські перевезення та інформаційні технології в судноплаванні: Матеріали наук.-техн. конф., 18-19 листоп. 2014 – Одеса: ОНМА, 2014. – С. 111 – 113.

50. Бурмака И.А. Влияние числа линий положения на точность обсервации / Бурмака И.А., Алексейчук Б.М. // Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті (MINTT-2014): Матеріали VI Міжнародної наук.-практ. конф., 27-29 травня. 2014 – Херсон: ХДМА, 2014. – С. 107 – 110.

51. Бурмака И.А. Маневр расхождения нескольких судов изменением курсов / Бурмака И.А., Булгаков А.Ю. // Сучасні технології проектування, побудови, експлуатації і ремонту суден, морських технічних засобів і інженерних споруд: Матеріали Всеукраїнської наук.-тех. конф. з міжнародною участю, 20-22 травня 2015 р. – Миколаїв : МУК, 2015. – С. 22 – 24.

52. Бурмака И.А. Определение оптимального вектора управления судами для безопасного расхождения / Бурмака И.А., Булгаков А.Ю. // Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті (MINTT-2015): Матеріали VII Міжнародної наук.-практ. конф., 26-28 травня. 2015 – Херсон: ХДМА, 2015. – С. 96 – 98.

53. Бурмака И.А. Учет инерционности судна и навигационных опасностей при расчете опасных областей курсов / Бурмака И.А., Калиниченко Г.Е. // Морські перевезення та інформаційні технології в судноплаванні: Матеріали наук.-техн. конф., 19-20 листоп. 2015 – Одеса: ОНМА, 2015. – С. 114 – 115.

54. Бурмака И.А. Использование областей опасных скоростей для расхождения судов в стесненных условиях / Бурмака И.А., Кулаков М.А. // Морські перевезення та інформаційні технології в судноплаванні: Матеріали наук.-техн. конф., 19-20 листоп. 2015 – Одеса: ОНМА, 2015. – С. 115 – 117.

55. Бурмака И.А. Требования, обеспечивающие наличие множества маневров расхождения судов изменением скоростей / Бурмака И.А. // Річковий та морський транспорт: інфраструктура, судноплавання, перевезення, безпека: Матеріали наук.-техн. конф., 16-17 листоп. 2016 – Одеса: ОНМА, 2016. –

С. 120 – 122.

56. Бурмака И.А. Типы управления парой судов в ситуации опасного сближения / Бурмака И.А. // Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті (MINTT-2016): Матеріали VIII Міжнародної наук.-практ. конф., 24-26 травня. 2016 – Херсон: ХДМА, 2016. – С. 109 – 112.

57. Бурмака И.А. Условие существования множества маневров расхождения судов изменением скоростей / Бурмака И.А.// Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті (MINTT-2017): Матеріали IX Міжнародної наук.-практ. конф., 23-25 травня. 2017 – Херсон: ХДМА, 2017. – С. 91 – 92.

58. Бурмака И. А. Определение допустимого множества маневров расхождения судов изменением скоростей / Бурмака И.А., Кулаков М.А., Калиниченко Г.М. // Сучасні технології проектування, побудови, експлуатації і ремонту суден, морських технічних засобів і інженерних споруд: Матеріали Всеукраїнської наук.-тех. конф. з міжнародною участю, 17-18 травня 2017 р. – Миколаїв: МУК, 2017. – С. 21 – 23.

59. Бурмака И.А. Внешнее управление процессом расхождения судов с помощью области их опасных курсов и скоростей / Бурмака И.А., Пасечнюк С.С. // Транспортні технології (морський та річковий флот): інфраструктура, судноплавство, перевезення, автоматизація: Матеріали наук.-техн. конф., 16-17 листоп. 2017 – Одеса: НУ «ОМА», 2018. – С. 139 – 142.

60. Бурмака И.А. Уравнение границы области недопустимых значений параметров движения сближающихся судов / Бурмака И.А.// Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті (MINTT-2018): Матеріали X Міжнародної наук.-практ. конф., 29-31 травня. 2018 – Херсон: ХДМА, 2018. – С. 93 – 95.

61. Бурмака И.А. Формирование области недопустимых значений скоростей судов с учетом их инерционно-тормозных характеристик / Бурмака И.А. // Транспортні технології (морський та річковий флот): інфраструктура, суд-

ноплавство, перевезення, автоматизація: Матеріали наук.-техн. конф., 15-16 листоп. 2018 – Одеса: НУ «ОМА», 2018. – С. 190 – 193.

62. I. Burmaka Safe passing with momentum consideration / Igor Burmaka, Dmytro Zhukov, Mykhaylo Miyusov, Marina Chesnokova // The international Association of Maritime Universities (IAMU) Conference book. The 20th Commemorative Annual General Assembly (AGA 20), 30 October – 1 November 2019, Tokyo, Japan. P. 73 – 74.

ANNOTATION

Burmaka I.O. Development of the theory and methods of external vessels' operation in a situation of a risk of collision. - Qualifying scientific work as a manuscript. Dissertation paper for the degree of Doctor of Technical Sciences in the specialty 05.22.13 - Navigation and Traffic Control (271 - River and Sea Transport). - National University «Odessa Maritime Academy», Odessa, 2020.

As a result of previous analysis of literature on a problem of providing and improving of safety of ship's navigation, it was found out that the main directions of the solution of the identified problem are ensuring the proper level of accuracy of determining the location of the ship and development of methods of quantitative assessment of navigation safety in the congested conditions of intensive navigation, modeling movement of the ship while sailing in congested areas, which is connected to performing different ship maneuvers which contribute to more effective and safe navigation, and development of the theory and methods for preventing collisions at sea in coastal areas.

The analysis exposed that one of the most actual aspects of ensuring safe navigation is prevention of vessels' collisions while navigating in the congested waters, which determines the theme of dissertation research which is devoted to the development of principle of complete external process control of vessels' divergence and the development of effective methods of its realization.

The purpose of dissertation research and its main task is formulated in the developed technological card of research; thus the main task is divided into several independent component tasks. The hypothesis of scientific research has been proposed and confirmed, it is shown that as a result of solution of independent component tasks the appropriate scientific results of the dissertation work which contain scientific novelty were obtained.

The practical value and importance of dissertation paper are conditioned by the possibility of the introduction of the practical recommendations which were received in the dissertation paper and contribute to reducing the accident rate of navigation. General scientific principle of work which contains the sense of dissertation research is formulated.

The paper describes the general problem solving method of the main problem by finding solutions to the constituent problems of the dissertation, and the procedure primarily reflects the generalized algorithm of dissertation research by the stepwise solution of the constituent problem, not just their formal description. To this end, theoretical developments has been carried out using modern methods of analysis and simulation was performed to confirm the accuracy of the results of the dissertation research.

The principles of forming of vessels' collision avoidance of elementary group of vessels have been formulated, at the heart of which there is the principle of process control of vessel divergence, methods of assessment of close-quarters situation and choice of divergence maneuver and domain form of inappropriate positions. The interconnection of parameters of true and relative motion of vessels of the elementary group is explored and its analysis is conducted. The analytical expressions of direct and reverse reflections of space of relative motion to the space of true motion have been obtained. The analytical description of the situation of close-quarters situation of vessels of the elementary group has been conducted which allows to detect the occurrence of situational indignation and to evaluate its intensity.

The possibility of forming of three types of domains is shown: the domain of invalid data of courses of the elementary group of vessels, the domain of invalid data of speeds of the elementary group of vessels, the domain of invalid data of courses of one ship and speeds of another ship.

The analytical description of system of prevention vessels' collision has been conducted, where the domain of round form is used. The analytical expressions of

three types of domains limits of invalid data has been obtained. The method of domain forming of invalid data of courses of the elementary group of vessels, which takes into account the correlation of speeds of the group of vessels is shown. The method of calculation of domains limits of speeds of the elementary group of vessels has been obtained and the analytical method of calculation of optimum divergence maneuver has been offered, and two methods of the use of computer algorithms for this purpose has been also developed. The method of forming and application of domain of invalid data of courses of one vessel and speeds of another vessel and the correlation of vessels' speeds, which is substantial, has been offered. Computer algorithms of forming and graphic display of all types of domains has been developed, their use for the choice of safe strategy of vessel divergence by the change of parameters of motion of both vessels is shown.

The processed questions of account of vessels' dynamics and navigational dangers at forming of domains of invalid data of motion parameters and calculation of their scopes. The procedure of forming the domain of invalid data of vessels' courses of the elementary group has been offered to take into account their inertia at the change of courses. The application of different dynamic models of turning motion of the vessel and their influence on the safety divergence is shown. The method of the specified forming of domains of invalid data of vessels' motion parameters of the elementary group is considered at the change of speed taking into account their inertia-stopping characteristics. The method of calculation of domains of a new type of invalid data of vessels' speeds of the elementary group has been obtained, which allows to do the effective choice of optimal divergence maneuver by the reduce of vessels' speeds. The method of taking into account the navigational dangers has been obtained at the choice of divergence maneuver by the domains of invalid data of vessels' motion parameters, which foresees the change of course of one or both vessels. The features of the method are considered depending on the type of navigational danger. The procedures of taking into account the point, linear and complex-positioned navigational dangers have been de-

veloped.

The situations of dangerous close-quarters situation of a group of more than two vessels and methods of choosing safe divergence maneuver in such situations are considered in work. The procedure of taking into account of the third vessel in choosing a safe joint divergence maneuver by alteration the course and speed of a pair of vessels is proposed both active and passive stopping of the vessel is thus considered, which reduces the speed. The computer implementation of the proposed procedure is shown. The method of choosing the divergence maneuver of the three vessels is developed by the general application of the domain of invalid data of the group vessels' course. The question of determination of the optimum vector of external operation of a group of vessels which are dangerously approach by the minimum alteration of their courses is explored. The possibilities of computer implementation of the method are shown. Therefore, the developed procedure of choice of the optimum control vector by the computer scanning of dangerous areas of dual maneuvers, and also the realization of a graphic method of determination of optimum divergence maneuver of a group of the vessels is offered by the computer simulation.

The collision prevention of ships whose domains are elliptical, rectangular and complex investigated in paper and obtained analytical expressions for maximum allowed distance of approach from the parameters of the approach situation and of safe domain forms. The numeral examples of dependencies for various forms of the domain are given. The procedure of the domain formation of invalid data of vessels' motion is developed and prevention of vessels' collision with the domain usage of elliptical and complex form. It is shown that these forms to the domain procedures can be similar. The method of calculating of vessels' collision prevention the boundary domain of invalid vessels' courses while using a rectangular domain is proposed. Many examples of formation of areas for various situations of dangerous close-quarters situation taking into account the correlation of vessels' speeds of the elementary group are given.

In completion of paper the results of verification of accuracy of the dissertation paper results represented, for which the simulation computer program consisting of two basic modules which provide the choice of divergence maneuver by one of the developed methods for a given situation of dangerous close-quarters situation and reproduction of the chosen divergence maneuver, resulting in the conclusion about its accuracy was designed.

The scientific novelty of the results obtained in dissertation paper consists in creation of analytical methods of calculation of prevention of vessels' collision, implementation of which is provided in the computer navigation system of decision support, which differ in use of principles of external operation and application of methods control of vessels' divergence with usage methods of determination of its optimum strategy. This uses the domain of invalid data of vessels' movement parameters which take into account the safe form of vessel's domain.

In dissertation paper:

- the principles of external operation control of vessels' divergence have been initiated for the first time, application of which is foreseen in Vessel Traffic Service (VTS) which can significantly increase the efficiency and safety of the divergence strategy;
- the analytical methods of calculation of prevention of vessels' collision which are divided into standard and non-standard ones have been firstly offered and developed, that provides the possibility of determination of divergence maneuver depending on the form of safe vessel's domain;
- the group of methods of the analytical system of prevention of vessels' collision are developed for the first time for the formation of domain of invalid data parameters of their motion, by the graphic display of which the divergence strategies are determined, that provides efficiency and decision-making accuracy for prevention of vessels' collision;
- the method of determination of external operation of optimum vector by the group of vessels which dangerously approach to each other, by what safe

divergence is achieved by the courses' alteration of the minimum quantity of vessels of group;

- the general method of taking into account navigational dangers and ship's dynamics has been firstly formed at certain domains of invalid data of their motion parameters which foresees the use of different models of alteration motion of vessels and their stopping, that provides accuracy of the use of the obtained results in the congested districts of navigation;

- the methods of taking into account the third vessel while determination of certain divergence maneuver parameters of vessels of the elementary group due to the use of the principles of the external operation control of vessels' divergence by the domain of invalid data of their motion parameters.

The conducted dissertation research has practical results which can be implemented on board the vessels during their operation and can be applied by the navigational information systems designers in order to operate the external vessels' divergence and by the designers of sophisticated modern navigational simulators.

The practical results of the dissertation research were implemented by the company «CMA Ships of Ukraine» for education, training, and retraining of navigational officers to ensure safety of navigation (implementation act of 05.03.2020), the Kherson State Maritime Academy (implementation act of 27.05.2020) for the cadets' and students' training, the private higher education institution «Institute of Postgraduate Education» «Odessa Maritime Training Center» for navigators training (implementation act of 17.06.2020), the Danube Institute of the National University «Odessa Maritime Academy» (implementation act of 01.09.2020) and the Branch «Delta Pilot» of the State Enterprise «Administration of Sea Ports of Ukraine» for the safety of navigation (implementation act of 14.09.2020). The materials of the dissertation research are used in the educational process of the National University «Odessa Maritime Academy» when teaching the discipline «Ship's maneuver and handling» (implementation act of 03.06.2020), in the framework of state-research works (SRW) of the National University «Odessa

Maritime Academy»: «Providing of safety of navigation in congested waters» (№ 0115U003580, 2018) and «Improvement of the methods of safe ship's handling» (№ 0117U005133, 2020) in which the author of this paper took part as executor in the first SRW and supervisor in the second.

During the dissertation research the following patents were received:

- the patent for the useful model №134690 «The device for maintenance of highly accurate safe vessels' divergence», which is registered in the State Register of patents of Ukraine for the useful model 27.05.2019

- the patent for the useful model №134691 «The device for the definition of highly accurate parameters of vessels' divergence maneuver at their external operation», which is registered in the State register of patents of Ukraine for the useful model 27.05.2019.

Keywords: safety of navigation, prevention of vessels' collision, external operation, analytical systems of prevention of vessels' collision, vessels' divergence maneuvers with the common change of their motion parameters, domains of invalid data.

The main results of the candidate's dissertation research were published in the following scientific works:

Main publications on the topic of the dissertation

1. Цымбал Н.Н. Гибкие стратегии расхождения судов / Цымбал Н.Н., Бурмака И.А., Тюпиков Е.Е. – Одесса: КП ОГТ, 2007. – 424 с.

2. Бурмака И.А. Теория и методы внешнего оптимального управления судов в ситуации опасного сближения: монография / И.А. Бурмака – Одесса: НУ «ОМА», 2019 – 284 с.

3. Бурмака И.А. Расчет характеристик поворотливости судна по экспериментальным данным / Бурмака И.А. // Судовождение / ОНМА. Вип. 9 – Одесса: Фенікс, 2005. – С. 7 – 13; **база(и) Google Академія.**

4. Бурмака И.А. Результаты имитационного моделирования процесса расхождения судов с учетом их динамики / Бурмака И.А. // Судовождение / ОНМА. Вип. 10 – Одесса: Фенікс, 2005. – С. 21 – 25; **база(и) Google Академія.**

5. Бурмака И.А. Поликритериальное управление процессом судовождения / Бурмака И.А., Дудник С.А. // Судноводіння: Зб. наук. праць / ОНМА. – Вип. 12. – Одеса: «ВидавІнформ», 2006. – С. 26 – 30; **база(и) Google Академія.**

6. Бурмака И.А. Принцип внешнего управления процессом судовождения в стесненных условиях / Бурмака И.А. // Судовождение: Зб. наук. праць / ОНМА. Вип. 13. – Одеса: «ВидавІнформ», – 2007. – С. 28 – 32; **база(и) Google Академія.**

7. Стебновский О.В. Особенности управления судами в стесненных водах / Стебновский О.В., Бурмака И.А. // Судноводіння: Зб. наук. праць / ОНМА, Вип. 16. – Одесса: «ВидавІнформ», 2009. – С. 157 – 161; **база(и) Google Академія.**

8. Стебновский О.В. Экспериментальные данные по поворотливости судна / Стебновский О.В., Бурмака И.А. // Судноводіння: Зб. наук. праць / ОНМА, Вип. 17. – Одесса: «ВидавІнформ», 2009. – С. 205 – 208; **база(и) Google Академія.**

9. Стебновский О.В. Расчет координат начала поворота судна из одного участка программной траектории на другой / Стебновский О.В., Бурмака И.А. // Судноводіння: Зб. наук. праць / ОНМА, Вип. 18. – Одесса: «ВидавІнформ», 2010. – С. 171 – 178; **база(и) Google Академія.**

10. Бурмака И.А. Определение параметров динамической модели поворотливости судна по натурным наблюдениям / Бурмака И.А., Бурмака А.И. // Судноводіння: Зб. наук. праць / ОНМА, Вип. 19. – Одесса: «ВидавІнформ», 2010 – С. 24 – 27; **база(и) Google Академія.**

11. Бурмака И.А. Учет инерционности судна при решении задач в ситуационно - технической системе предупреждения столкновений судов // Бурмака И.А. // Проблемы техніки: науково-виробничий журнал. – 2013. - №1. – С. 45-54; **база(и)** *Google Академія*.

12. Бурмака И.А. Взаимодействие судов с компенсацией ситуационного возмущения / Бурмака И.А., Калиниченко Г.Е. // Проблемы техніки: науково-виробничий журнал. – 2014. № 1. – С. 89 – 93 **база(и)** *Google Академія*.

13. Бурмака И.А. Учет динамики судна при плавании в стесненных водах / Бурмака И.А., Калиниченко Г.Е., Сааков В.А. // Проблемы техніки: науково-виробничий журнал. – 2014. № 4. – С. 48 – 54; **база(и)** *Google Академія*.

14. Бурмака И.А. Определение области курсов двух судов, обеспечивающих безопасное расхождение/ Бурмака И.А, Булгаков А.Ю. // Эксплуатация, безопасность и экономика водного транспорта. Вестник Государственного морского университета им. адмирала Ф. Ф. Ушакова. Новороссийск. – 2014. – выпуск 2 (7). – С. 17 – 20; **база(и)** *РИНЦ*.

15. Бурмака И.А. Управление группы судов в ситуации опасного сближения / Бурмака И.А., Булгаков А.Ю. // Вестник Государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. Санкт-Петербург. – 2014. – выпуск 6 (28). – С. 9 – 13; **база(и)** *Google scholar, РИНЦ, Ulrichsweb, Crossref*.

16. Бурмака И.А. Маневр расхождения трех судов изменением курсов / Бурмака И.А., Булгаков А.Ю. // Автоматизация судовых технических средств: науч.-техн. сб. – 2014. – Вып. 20. Одесса: ОНМА. – С. 18 – 23; **база(и)** *Index Copernicus*.

17. Бурмака И.А. Зависимость точности обсервации от существенных факторов / Бурмака И.А., Алексейчук Б.М. // Водный транспорт: Сб. научн. трудов, Вып. 2(20). – К.: КДАВТ, 2014 – С. 18 – 23; **база(и)** *Index Copernicus*.

18. Бурмака И.А. Управление парой судов в ситуации опасного сближения / Бурмака И.А., Калиниченко Г.Е., Кулаков М.А. // Вестник Государ-

ственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. Санкт-Петербург. – 2016. – Выпуск 3 (37). – С. 64 – 71; **база(и)** *Google scholar, РИНЦ, Ulrichsweb, Crossref*.

19. Бурмака И.А. Оценка эффективности обсервованных координат судна при избыточных измерениях / Бурмака И.А., Астайкин Д.В., Алексейчук Б.М. // Вестник Государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. Санкт-Петербург. – 2016. – Выпуск 1 (35). – С. 24 – 29; **база(и)** *Google scholar, РИНЦ, Ulrichsweb, Crossref*.

20. Y. Kalinichenko. Analysis of mathematical models of changing the vessel's course when turning / Y. Kalinichenko, I. Burmaka // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2016. – 6/9 (84). – P. 20 – 31; **база(и)** *Scopus*

21. Бурмака И.А. Использование областей опасных курсов и опасных скоростей для выбора маневра расхождения/ Бурмака И.А., Пасечнюк С.С., Кулаков М.А. // Эксплуатация морского транспорта. Государственный морской университет им. адмирала Ф. Ф. Ушакова. Новороссийск. – 2017. – выпуск 2 (83). – С. 76 – 81; **база(и)** *РИНЦ*.

22. Бурмака И.А. Методы внешнего управления судами в ситуации опасного сближения / Бурмака И.А., Кулаков М.А., Калининченко Г.Е.// Науковий вісник Херсонської державної морської академії. – 2017. – № 2(17). – С. 4 – 14; **база(и)** *Google Академія*.

23. Бурмака И.А. Использование регрессионного анализа для обработки данных поворотливости судна / Бурмака И.А., Худенко Н.П. // Вісник ОНМУ: Зб. наук. праць ОНМУ, - 2014. - Вып. 1(40). – С. 83 – 88; **база(и)** *Google Scholar, Index Copernicus; CrossRef; Національна бібліотека України імені В.І. Вернадського*.

**Additional publication and publications that witness the approbation of
the dissertation paper materials.**

24. Бурмака И.А. Экстренная стратегия расхождения при чрезмерном сближении судов / И.А. Бурмака, А.И. Бурмака, Р.Ю. Бужбецкий – LAP LAMBERT Academic Publishing, 2014. – 202 с.

25. Пятаков Э.Н. Взаимодействие судов при расхождении для предупреждения столкновения / Э.Н. Пятаков, Р.Ю. Бужбецкий, И.А. Бурмака, А.Ю. Булгаков – Херсон: Гринь Д.С., 2015. – 312 с.

26. Бурмака И.А. Управление судами в ситуации опасного сближения / И.А. Бурмака., Э.Н. Пятаков., А.Ю. Булгаков - LAP LAMBERT Academic Publishing, - Саарбрюккен (Германия), – 2016. – 585 с.

27. Бурмака И.А. Оценка момента времени попадания судна в ситуацию чрезмерного сближения / Бурмака И.А., Сафин И.В., Бурмака А.И. // Проблеми техніки: науково-виробничий журнал. – 2014. № 4. – С. 108 - 118; **база(и) Google Академія.**

28. Бурмака И.А. Выбор оптимального вектора управления судами изменением курсов для безопасного расхождения / Бурмака И.А., Булгаков А.Ю. // Автоматизация судовых технических средств: науч.-техн. сб. – 2015. – № 21 – С. 29 – 33; **база(и) Index Copernicus.**

29. Бурмака И.А. Определение эффективности обсервованных координат судна при избыточных измерениях / Бурмака И.А., Астайкин Д.В., Алексейчук Б.М. // Судноводіння: Зб. наук. праць / ОНМА, Вип. 26. – Одесса: «ВидавІнформ», 2016 – С. 28 – 34; **база(и) Google Академія.**

30. Бурмака И.А. Основные характеристики группы судов при внешнем управлении процессом судовождения / Бурмака И.А., Калиниченко Г.Е., Кулаков М.А. // Судноводіння: Зб. наук. праць / ОНМА, Вип. 26. – Одесса: «ВидавІнформ», 2015 – С. 35 – 40; **база(и) Google Академія.**

31. Бурмака И.А. Выбор безопасного курса судна с учетом его инерционности при использовании областей опасных курсов / Бурмака И.А.// Авто-

матизация судовых технических средств: науч.-техн. сб. – 2016. – № 22. – С. 17 – 21; **база(и)** *Index Copernicus*.

32. Бурмака И.А. Условие существования множества маневров расхождения судов изменением скоростей/ Бурмака И.А. // Судноводіння: Зб. наук. праць / ОНМА, Вип. 27. – Одесса: «ВидавІнформ», 2017. – С. 32 – 37; **база(и)** *Google Академія*.

33. Бурмака И.А. Предупреждение столкновений судов методами внешнего управления процессом расхождения / Бурмака И.А., Калиниченко Г.Е., Кулаков М.А. // Science and Education a New Dimension. Natural and Technical Sciences, V (14), Issue: 132, 2017. - С. 56 - 60; **база(и)** *Index Copernicus: ICV 2014: 70.95; ICV 2015: 80.87; ICV 2016: 73.35; ICV 2018: 90.25, ICV 2019: 89.50; Google Scholar; Ulrichs Web Global Serials Directory; Union of International Associations Yearbook; Scribd; Academia.edu*.

34. Бурмака И.А. Применение областей недопустимых значений параметров для предупреждения столкновений судов при их внешнем управлении / Бурмака И.А., Кулаков М.А., Пасечнюк С.С. // East European Scientific Journal, №11 (27), 2017, part 1. – С. 40 – 48; **база(и)** *Index Copernicus; Academic Resource Index; International Scientific Indexing; Cosmos Impact Factor*.

35. Бурмака И. А. Оптимальный маневр расхождения судов изменением их скоростей / Бурмака И. А. // XXVII Международная конференция «Развитие науки в XXI веке», 15 сентября 2017г. – Харьков – С. 24 – 27.

36. Бурмака И.А. Формализация области опасных курсов и скоростей судов при внешнем управлении их процессом расхождения / Бурмака И.А., Пасечнюк С.С. // Судовождение: Зб. наук. праць / НУ «ОМА». - Вип. 28. – Одесса: «ВидавІнформ», 2018. – С. 16 – 24; **база(и)** *Google Академія*.

37. Бурмака И.А. Способ аналитического расчета оптимального маневра расхождения пары судов изменением скоростей / Бурмака И.А. // Автоматизация судовых технических средств: науч.-техн. сб. – 2017. – № 23. – С. 9 – 14; **база(и)** *Index Copernicus*.

38. Бурмака И.А. Выбор стратегии расхождения группы судов методами внешнего управления/ Бурмака И.А. // *Science and Education a New Dimension. Natural and Technical Sciences*, V (16), Issue: 148, 2017. - С. 66 – 71; **база(и)** *Index Copernicus: ICV 2014: 70.95; ICV 2015: 80.87; ICV 2016: 73.35; ICV 2018: 90.25, ICV 2019: 89.50; Google Scholar; Ulrichs Web Global Serials Directory; Union of International Associations Yearbook; Scribd; Academia.edu*

39. Бурмака И.А. Применение областей недопустимых значений параметров движения судов для безопасного расхождения / Бурмака И.А., Пятаков Э.Н. // *Austria - science*, Issue: 11, 2018. – С. 34 – 39; **база(и)** *Google Scholar, Academic Resource Index; Global Impact Factor, International Scientific Indexing; The Asian Education Index; CiteFactor (Academic Scientific Journals)*.

40. Бурмака И.А. Выбор совместной стратегии расхождения судов изменением параметров движения при их внешнем управлении / И.А. Бурмака, С.С. Пасечнюк // *Science and Education a New Dimension. Natural and Technical Sciences*, VI (18), Issue: 158, 2018. – С. 41 – 46; **база(и)** *Index Copernicus: ICV 2014: 70.95; ICV 2015: 80.87; ICV 2016: 73.35; ICV 2018: 90.25, ICV 2019: 89.50; Google Scholar; Ulrichs Web Global Serials Directory; Union of International Associations Yearbook; Scribd; Academia.edu*

41. Бурмака И.А. Учет инерционно-тормозных характеристик при выборе маневра расхождения изменением скоростей судов / Бурмака И.А. // *Austria - science*, Issue: 16, 2018. – С. 34 – 38; **база(и)** *Google Scholar, Academic Resource Index; Global Impact Factor, International Scientific Indexing; The Asian Education Index; CiteFactor (Academic Scientific Journals)*.

42. Бурмака И.А. Применение области недопустимых значений параметров движения судов для безопасного расхождения при наличии мешающего судна / Бурмака И.А. // *Science and Education a New Dimension. Natural and Technical Sciences*, VI (22), Issue: 186, 2018. - С. 53 – 58 **база(и)** *Index Copernicus: ICV 2014: 70.95; ICV 2015: 80.87; ICV 2016: 73.35; ICV 2018: 90.25, ICV*

2019: 89.50; *Google Scholar*; *Ulrichs Web Global Serials Directory*; *Union of International Associations Yearbook*; *Scribd*; *Academia.edu*

43. Бурмака И.А. Маневр последовательного расхождения с двумя целями изменением курса и пассивным торможением / Бурмака И.А., Пятаков Э.Н. // *East European Scientific Journal*, № 5 (33), 2018, part 1. – С. 19 – 25; **база(и)** *Index Copernicus*; *Academic Resource Index*; *International Scientific Indexing*; *Cosmos Impact Factor*.

44. Бурмака И.А. Определение предельно-допустимой дистанции сближения при эллиптической форме судового домена / Бурмака И.А. // *Austria - science*, Issue: 23, 2019. – С. 36 – 43; **база(и)** *Google Scholar*, *Academic Resource Index*; *Global Impact Factor*, *International Scientific Indexing*; *The Asian Education Index*; *CiteFactor (Academic Scientific Journals)*.

45. Singh B., Burmaka I. Use of an electronic chart for choosing an effective maneuver for a vessel to pass at a safe distance among several targets // *Sailor Today*, Oct. 2018. – P. 41 – 42.

46. Бурмака И.А. Выбор оптимальной стратегии расхождения группы судов / Бурмака И.А. // *Судноплавство: перевезення, технічні засоби, безпека: Матеріали наук.-техн. конф., 19-20 листоп. 2013* – Одеса: ОНМА, 2014. – С. 83 – 85.

47. Бурмака И.А. Характеристики безопасности системы взаимодействия судов / Бурмака И.А. // *Эффективная и безопасная эксплуатация морских судов и сооружений: Материалы VI Всеукраинской научно-технической конференции, 2-4 октября 2013 г. - Севастополь: СевНТУ, 2013.* – С. 133 – 136.

48. Бурмака И.А. Маневр расхождения нескольких судов изменением курсов / Бурмака И.А., Булгаков А.Ю. // *Морські перевезення та інформаційні технології в судноплавстві: Матеріали наук.-техн. конф., 18-19 листоп. 2014* – Одеса: ОНМА, 2014. – С. 108 – 111.

49. Бурмака И.А. Маневрирование судна при плавании в стесненных условиях / Бурмака И.А., Сааков В.А., Калиниченко Г.Е. // Морські перевезення та інформаційні технології в судноплаванні: Матеріали наук.-техн. конф., 18-19 листоп. 2014 – Одеса: ОНМА, 2014. – С. 111 – 113.

50. Бурмака И.А. Влияние числа линий положения на точность обсервации / Бурмака И.А., Алексейчук Б.М. // Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті (MINTT-2014): Матеріали VI Міжнародної наук.-практ. конф., 27-29 травня. 2014 – Херсон: ХДМА, 2014. – С. 107 – 110.

51. Бурмака И.А. Маневр расхождения нескольких судов изменением курсов / Бурмака И.А., Булгаков А.Ю. // Сучасні технології проектування, побудови, експлуатації і ремонту суден, морських технічних засобів і інженерних споруд: Матеріали Всеукраїнської наук.-тех. конф. з міжнародною учас-ттю, 20-22 травня 2015 р. – Миколаїв : МУК, 2015. – С. 22 – 24.

52. Бурмака И.А. Определение оптимального вектора управления судами для безопасного расхождения / Бурмака И.А., Булгаков А.Ю. // Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті (MINTT-2015): Матеріали VII Міжнародної наук.-практ. конф., 26-28 травня. 2015 – Херсон: ХДМА, 2015. – С. 96 – 98.

53. Бурмака И.А. Учет инерционности судна и навигационных опасностей при расчете опасных областей курсов / Бурмака И.А., Калиниченко Г.Е.// Морські перевезення та інформаційні технології в судноплаванні: Матеріали наук.-техн. конф., 19-20 листоп. 2015 – Одеса: ОНМА, 2015. – С. 114 – 115.

54. Бурмака И.А. Использование областей опасных скоростей для расхождения судов в стесненных условиях / Бурмака И.А., Кулаков М.А.// Морські перевезення та інформаційні технології в судноплаванні: Матеріали наук.-техн. конф., 19-20 листоп. 2015 – Одеса: ОНМА, 2015. – С. 115 – 117.

55. Бурмака И.А. Требования, обеспечивающие наличие множества маневров расхождения судов изменением скоростей / Бурмака И.А. // Річковий та морський транспорт: інфраструктура, судноплавання, перевезення, безпе-

ка: Матеріали наук.-техн. конф., 16-17 листоп. 2016 – Одеса: ОНМА, 2016. – С. 120 – 122.

56. Бурмака И.А. Типы управления парой судов в ситуации опасного сближения / Бурмака И.А. // Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті (MINTT-2016): Матеріали VIII Міжнародної наук.-практ. конф., 24-26 травня. 2016 – Херсон: ХДМА, 2016. – С. 109 – 112.

57. Бурмака И.А. Условие существования множества маневров расхождения судов изменением скоростей / Бурмака И.А. // Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті (MINTT-2017): Матеріали IX Міжнародної наук.-практ. конф., 23-25 травня. 2017 – Херсон: ХДМА, 2017. – С. 91 – 92.

58. Бурмака И. А. Определение допустимого множества маневров расхождения судов изменением скоростей / Бурмака И.А., Кулаков М.А., Калиниченко Г.М. // Сучасні технології проектування, побудови, експлуатації і ремонту суден, морських технічних засобів і інженерних споруд: Матеріали Всеукраїнської наук.-тех. конф. з міжнародною участю, 17-18 травня 2017 р. – Миколаїв: МУК, 2017. – С. 21 – 23.

59. Бурмака И.А. Внешнее управление процессом расхождения судов с помощью области их опасных курсов и скоростей / Бурмака И.А., Пасечнюк С.С. // Транспортні технології (морський та річковий флот): інфраструктура, судноплавство, перевезення, автоматизація: Матеріали наук.-техн. конф., 16-17 листоп. 2017 – Одеса: НУ «ОМА», 2018. – С. 139 – 142.

60. Бурмака И.А. Уравнение границы области недопустимых значений параметров движения сближающихся судов / Бурмака И.А. // Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті (MINTT-2018): Матеріали X Міжнародної наук.-практ. конф., 29-31 травня. 2018 – Херсон: ХДМА, 2018. – С. 93 – 95.

61. Бурмака И.А. Формирование области недопустимых значений скоростей судов с учетом их инерционно-тормозных характеристик / Бурмака И.А.

// Транспортні технології (морський та річковий флот): інфраструктура, судноплавство, перевезення, автоматизація: Матеріали наук.-техн. конф., 15-16 листоп. 2018 – Одеса: НУ «ОМА», 2018. – С. 190 – 193.

62. I. Burmaka Safe passing with momentum consideration / Igor Burmaka, Dmytro Zhukov, Mykhaylo Miyusov, Marina Chesnokova // The international Association of Maritime Universities (IAMU) Conference book. The 20th Commemorative Annual General Assembly (AGA 20), 30 October – 1 November 2019, Tokyo, Japan. P. 73 – 74.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК ПРИЙНЯТИХ СКОРОЧЕНЬ	40
ВСТУП.....	41
РОЗДІЛ 1. ОСНОВНІ НАПРЯМКИ ВИРІШЕННЯ ПРОБЛЕМИ ПІДВИЩЕННЯ БЕЗПЕКИ СУДНОВОДІННЯ	51
1.1. Огляд та аналіз літературних джерел за проблемою забезпечення безаварійного плавання суден	51
1.2. Вибір основного напрямку дисертаційного дослідження	79
1.3. Висновки за першим розділом.....	81
РОЗДІЛ 2. МЕТОДОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДИСЕРТАЦІЙНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ	83
2.1. Визначення теми наукового дослідження	83
2.2. Характеристика методів дослідження дисертаційної роботи	85
2.3. Методика проведення дослідження по темі дисертації.....	92
2.4. Висновки за другим розділом	94
РОЗДІЛ 3. МАТЕМАТИЧНИЙ ОПИС ЕЛЕМЕНТАРНОЇ ГРУПИ СУДЕН, ЩО НЕБЕЗПЕЧНО ЗБЛИЖУЮТЬСЯ.....	96
3.1. Аналітичний опис принципів попередження зіткнення суден елементарної групи	96
3.2. Взаємозв'язок параметрів істинного і відносного руху суден елементарної групи та його аналіз	103
3.3. Аналітичний опис ситуації небезпечного зближення суден елементарної групи	123
3.4. Формалізація областей неприпустимих значень параметрів руху суден.....	129

3.5. Висновки за третім розділом.....	132
РОЗДІЛ 4. АНАЛІТИЧНІ МЕТОДИ ПОПЕРЕДЖЕННЯ ЗІТКНЕННЯ СУДЕН ДЛЯ СТАНДАРТНОГО ДОМЕНУ	134
4.1. Формування і застосування області неприпустимих значень курсів елементарної групи суден	134
4.2. Розрахунок меж області неприпустимих значень швидкостей елементарної групи суден і вибір з її допомогою маневру розходження.....	144
4.3. Формування і застосування області неприпустимих значень курсів одного судна і швидкостей другого судна.....	171
4.4. Висновки за четвертим розділом	179
РОЗДІЛ 5. ВРАХУВАННЯ ДИНАМІКИ СУДЕН І НАВІГАЦІЙНИХ НЕБЕЗПЕК ПРИ ФОРМУВАННІ ОБЛАСТЕЙ НЕПРИПУСТИМИХ ЗНАЧЕНЬ ЇХ ПАРАМЕТРІВ РУХУ	180
5.1. Формування області неприпустимих значень курсів суден елементарної групи із врахуванням їх інерційності при зміні курсів.....	180
5.2. Врахування інерційно-гальмівних характеристик суден елементарної групи при формуванні областей неприпустимих значень параметрів їх руху при зміні швидкості	190
5.3. Врахування навігаційних небезпек при виборі маневру розходження за допомогою областей неприпустимих значень параметрів руху суден	195
5.4. Висновки за п'ятим розділом	211
РОЗДІЛ 6. ВИБІР МАНЕВРУ РОЗХОДЖЕННЯ В СИТУАЦІЇ НЕБЕЗПЕЧНОГО ЗБЛИЖЕННЯ КІЛЬКОХ СУДЕН	212

6.1. Врахування третього судна, що заважає, судна при виборі безпечного спільного маневру розходження суден зміною їх курсу та швидкості	212
6.2. Вибір маневру розходження трьох суден за допомогою області неприпустимих значень курсів суден.....	219
6.3. Визначення оптимального вектору зовнішнього управління групою суден, що небезпечно зближаються	226
6.4. Вибір оптимального вектору керування способом комп'ютерного сканування небезпечних областей парних маневрів	234
6.5. Реалізація графічного способу визначення оптимального маневру розходження групи суден за допомогою комп'ютерного моделювання.	237
6.6. Висновки за шостим розділом	240
РОЗДІЛ 7. АНАЛІТИЧНІ МЕТОДИ ПОПЕРЕДЖЕННЯ ЗІТКНЕННЯ СУДЕН ДЛЯ НЕСТАНДАРТНИХ ДОМЕНІВ	242
7.1. Залежність гранично допустимої дистанції зближення D_d від параметрів ситуації зближення і форми безпечного домену	242
7.2. Формування області неприпустимих значень курсів суден в нестандартних аналітичних системах попередження зіткнення суден з доменом еліптичної і складної форми.....	252
7.3. Розрахунок межі області неприпустимих значень курсів суден при використанні прямокутного домену в нестандартних аналітичних системах попередження зіткнення	259
7.4. Перевірка коректності результатів дисертаційної роботи імітаційним моделюванням	264
7.5. Висновки за сьомим розділом.....	266
ВИСНОВКИ	268

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	271
ДОДАТОК А	297
ДОДАТОК Б	325
ДОДАТОК В	352
ДОДАТОК Г	390
ДОДАТОК Д	427
ДОДАТОК Е Список публікацій здобувача та відомості про апробацію результатів дисертації	482
ДОДАТОК Ж Акти впровадження результатів дисертаційного дослідження	490

ПЕРЕЛІК ПРИЙНЯТИХ СКОРОЧЕНЬ

DGPS – Differential Global Positioning System

IMO – International Maritime Organization

МЕК – Міжнародна електротехнічна комісія

ISO – Міжнародна організація по стандартизації

СОЛАС-74 – Міжнародна конвенція з охорони людського життя 1974 року

НІС – Навігаційно-інформаційна система

СУРС – Служба управління рухом суден

ПМ – Послідовність маневрів

ПП – Підрульовий пристрій

ЕОМ – Електронна обчислювальна машина

ЦНДІ – Центральний науково-дослідний інститут

AIC – Adaptive inverse control

ПІД регулятор – Пропорційно-інтегрально-диференціальний регулятор

SVM – Support Vector Machines

VTMIS – Vessel Traffic Management Information System

МПЗС 72 (COLREG) – Міжнародні правила запобігання зіткнення суден на морі 1972 року

ATSM – Autonomous Traffic Management System

УКХ – Ультракороткі хвилі

AIS – Automatic Identification System

GIS – Geographic Information System

MGIS – Marine Geographic Information System

ACO – Ant Colony Optimization

ВСТУП

Актуальність теми. Сьогодні транспорт, як складова частина світової економіки і один із факторів її подальшого розвитку, грає одну із головних ролей в житті світової спільноти. Як відомо, основним якісним показником роботи будь якого виду транспорту являється безпека. Особливе значення вона має в торговому мореплаванні з урахуванням того, що морем і річковими водними шляхами перевозиться близько 60% всіх вантажів світового ринку.

Морський транспорт сприяє промисловому розвитку більшості держав світу, веде до росту обробної промисловості, скріплює зв'язки між галузями і стимулює регіональну економічну та торгову інтеграції.

Зростання швидкостей та підвищення інтенсивності руху на водних шляхах, збільшення розмірів транспортних суден, плавання в складних навігаційних умовах роблять проблему забезпечення безаварійності судноплавства однією із найбільш пріоритетних і актуальних.

Від її вирішення залежить зменшення кількості аварійних випадків, що сприяє охороні людського життя на морі, зниженню шкоди навколишньому середовищу і майну.

За останні 40 років обсяги перевезень морем зросли майже в чотири рази, причому багатотоннажні судна складають приблизно 80% від світового тоннажу. Тоннаж світового флоту за останнє десятиріччя виріс практично в два рази, а кількість суден - на 40%.

За цей же час світовий флот втратив більш ніж 120 суден, що складає 1,4% від його загальної кількості. Якщо не враховувати риболовні судна, то на першому місці по втратах ро-ро судна в середньому 0,35% від загальної кількості суден даного типу. Далі суховантажні судна 0,30%, навалювальні судна 0,12% і пасажирські 0,12%. Менше всього втрат серед буксирів і офшорних суден.

Причини втрат суден розподілилися наступним чином: на першому місці затоплення (50%), потім посадка на мілину (20%), пожежа (10%) і зіткнення (7%).

Саме морські багатотоннажні судна близько 20% експлуатаційного часу проводять в прибережних стислих водах, які характеризуються інтенсивним судноплавством та навігаційними перешкодами, що значно ускладнює плавання морських суден в стислих водах і створює передумови для виникнення аварійних ситуацій. Слід зазначити, що в прибережних стислих водах виникає три четверті посадок на мілину і зіткнень суден.

Тому стислі води облаштовуються станціями управління рухом суден, які не тільки контролюють процес судноводіння, а в разі потреби забезпечують зовнішнє управління процесом розходження суден при виникненні ситуації небезпечного зближення.

В період 1995-2015 р.р. станції управління рухом суден були створені в країнах Європи (Норвегія, Фінляндія, Іспанія, Португалія, Італія, Туреччина, Греція, Румунія, Грузія, Кіпр, Мальта), в Азії (Бахрейн, Арабські Емірати, Саудівська Аравія, Малайзія, Індонезія, Філіппіни, Таїланд, Китай, Південна Корея, Сінгапур), в Африці, в Північній, Центральній і Південній Америці, в Австралії і Новій Зеландії. Згідно даним Міжнародної асоціації маячних служб в 2015 році в світі використовувалося понад 500 станцій управління рухом суден.

Не зважаючи на таке широке застосування станцій управління рухом суден по всьому світі і їх сучасне технічне оснащення, вони не забезпечені комп'ютерними інформаційними системами аналізу небезпечності ситуацій зближення суден і, в разі необхідності, визначення стратегії їх розходження.

Вказана обставина і практична відсутність розробок в питаннях зовнішнього управління процесом розходження суден обумовили вибір напрямку дисертаційного дослідження, присвяченого створенню методів оперативного і простого у використанні визначення рівня безпеки ситуації зближення суден і вибору параметрів стратегії їх розходження, які можуть бути реалізовані

в комп'ютерній системі зовнішнього управління процесом розходження суден.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Виконання роботи проводилося згідно до положень Транспортної стратегії України на період до 2020 р. (розпорядження Кабінету Міністрів України від 20.10.2010 р., №2174-р), рішення Ради національної безпеки і оборони України від 16.05.2008 р. «Про заходи щодо забезпечення розвитку України як морської держави» (указ Президента України від 20.05.2008 р. №463/2008), а також в рамках планів наукових досліджень Національного університету «Одеська морська академія» за держбюджетною темою «Забезпечення безпеки судноводіння в стислих районах плавання» (№ ДР 0115U003580, 2018 р.), в якій здобувачу належить окремий підрозділ та «Удосконалення методів безпечного управління судном» (№ ДР 0117U005133, 2020 р.), у якій автор дисертації є керівником.

Мета і задачі дослідження. Метою дисертаційного дослідження являється підвищення безпеки судноводіння шляхом розвитку принципу повного зовнішнього управління процесом розходження суден із розробкою оперативних методів його реалізації.

Науковою гіпотезою дисертаційного дослідження прийнято допущення про існування можливості підвищення оперативності і простоти вибору маневру розходження суден зовнішнім управлінням процесом розходження із використанням методів вибору оптимального маневру розходження.

Головна задача дослідження полягає в розробці алгоритмів і програми одержаних методів визначенням оптимальної стратегії розходження за допомогою областей неприпустимих значень параметрів руху суден, які ураховують форму безпечного домену судна.

Для вирішення головної задачі дисертації була здійснена її декомпозиції на незалежні складові задачі, для чого були використані методи теорії дослідження операцій. Виявилось доцільним розділити головну задачу дисертаційного дослідження на наступні незалежні складові задачі:

1. Розробка аналітичних методів розрахунку попередження зіткнення суден, яка призначена для визначення маневру розходження з використанням безпечного домену судна круглої форми.

2. Розробка нестандартних аналітичних методів попередження зіткнення суден, що забезпечують можливість розрахунку параметрів маневру розходження в разі еліптичної та прямокутної форм безпечного домену судна.

3. Дослідження розширеного принципу зовнішнього управління процесом розходження суден, що може бути застосованим як в СУРС, так і на судах при наявності відповідного обладнання, що може значно підвищити ефективність та безпеку процесу розходження.

4. Формування групи методів аналітичних розрахунків попередження зіткнення суден для розрахунку меж областей неприпустимих значень параметрів їх руху, за допомогою графічного відображення яких визначаються стратегії розходження, що забезпечує оперативність і коректність прийняття рішення по запобіганню небезпечних зближень суден.

5. Розробка методу перетворення матриці ситуаційного збурення в нульову матрицю, який заснований на визначенні оптимального вектору зовнішнього управління групою суден, що небезпечно зближаються, чим досягається безпечне розходження зміною курсів мінімальної кількості суден групи.

6. Формування загального методу урахування навігаційних перешкод і динаміки суден при визначенні меж областей неприпустимих значень їх параметрів руху, який передбачає використання різних моделей обертального руху суден та їх гальмування, що забезпечує коректність використання одержаних результатів в стислих районах плавання.

7. Розробка способу урахування третього судна при визначенні параметрів маневру розходження суден елементарної групи за рахунок використання принципу зовнішнього управління процесом розходження суден із допомогою областей неприпустимих значень параметрів їх руху.

Об'єктом дисертаційного дослідження дисертації є процес попере-

дження зіткнення суден.

Предметом дослідження є методи повного зовнішнього управління процесом розходження суден.

Методи дослідження. Рішення поставлених задач було досягнуте за рахунок використання у дисертаційному дослідженні наступних методів:

- дослідження операцій для декомпозиції головної задачі дисертації на незалежні складові задачі;
- теорії динамічних багатокерованих систем, яка дозволяє описати процес розходження суден з урахуванням декількох незалежних учасників, що управляють процесом, як динамічну систему;
- математичного програмування для коректної постановки задачі вибору оптимального маневру по відповідному критерію;
- математичного аналізу для розв'язання рівнянь руху судна і пошуку залежності параметрів руху судна від керуючих управлінь;
- аналітичної геометрії для формування області неприпустимих значень параметрів руху суден елементарної групи.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в створенні аналітичних методів розрахунку попередження зіткнення суден, реалізація яких передбачена в комп'ютерній навігаційній системі підтримки рішень, та які відрізняються використанням принципу зовнішнього управління процесом розходження суден і застосуванням методів визначення його оптимальної стратегії з використанням областей неприпустимих значень параметрів руху суден, що ураховують форму безпечного домену судна.

У дисертаційній роботі:

Вперше:

- започатковано принцип зовнішнього управління процесом розходження суден, застосування якого передбачено в СУРС, чим може бути значно підвищена ефективність та безпека стратегії розходження;
- запропоновано і розроблено методи аналітичного розрахунку стратегії попередження зіткнення суден при зовнішньому управлінні, які поділяються

на стандартні та нестандартні, що забезпечує можливість визначення маневру розходження в залежності від форми безпечного домену судна;

- розроблено групу методів для формування областей неприпустимих значень параметрів руху суден при зовнішньому управлінні їх процесом розходження, за допомогою графічного відображення яких визначаються стратегії розходження, що забезпечує оперативність і коректність прийняття рішення по запобіганню небезпечних зближень суден;

- розроблено метод визначення оптимального вектору зовнішнього управління групою суден, що небезпечно зближаються, яким досягається безпечне розходження зміною курсів мінімальної кількості суден групи;

- для зовнішнього управління процесом розходження суден сформовано загальний метод врахування їх динаміки і навігаційних перешкод при визначенні меж областей неприпустимих значень їх параметрів руху, який передбачає використання різних моделей обертового руху суден та їх гальмування, що забезпечує коректність використання одержаних результатів при розходженні суден в стислих районах плавання.

Одержали подальший розвиток методи урахування третього судна, що заважає, при визначенні параметрів маневру розходження суден елементарної групи за рахунок використання принципу зовнішнього управління процесом розходження суден за допомогою областей неприпустимих значень параметрів їх руху.

Проведеному дисертаційному дослідженню властиве практичне значення. Результати дослідження можуть бути впроваджені на судна в процесі їх експлуатації, використані при розробці навігаційних інформаційних систем попередження зіткнення, призначених для зовнішнього управління процесом розходження судна, та розробниками сучасних навігаційних тренажерів.

Практичні результати дисертаційного дослідження впроваджені компанією «СМА Шипс Україна» для навчання, підготовки і перепідготовки офіцерів морських суден по напрямку «Судноводіння» з метою забезпечення безпеки плавання (акт впровадження від 05.03.2020 р.), Херсонською державною

морською академією (акт про впровадження від 27.05.2020 р.) для підготовки курсантів та студентів, приватним вищим навчальним закладом «Інститут післядипломної освіти» «Одеський морський тренажерний центр» для підготовки судноводіїв (акт упровадження від 17.06.2020 р.), Дунайським інститутом Національного університету «Одеська морська академія» (акт про впровадження від 01.09.2020 р.) та філією «Дельта-лоцман» Державного підприємства «Адміністрація морських портів України» для забезпечення безпеки мореплавства (акт впровадження від 14.09.2020 р.). Матеріали дисертаційного дослідження використовуються в навчальному процесі Національного університету «Одеська морська академія» при викладанні дисципліни «Маневрування і управління судном» (акт про впровадження від 03.06.2020 р.), в рамках держбюджетних науково-дослідних робіт Національного університету «Одеська морська академія»: «Забезпечення безпеки судноводіння в стислих районах» (№ ДР 0115U003580, 2018 р.) та «Удосконалення методів безпечного управління судном» (№ ДР 0117U005133, 2020 р.), у яких автор дисертації брав участь як виконавець у першій ДР та керівник у другій ДР.

Під час виконання дисертаційної роботи наступні патенти були отримані:

- патент на корисну модель № 134690 «Пристрій для забезпечення високоточного безаварійного розходження суден». Дата публікації відомостей про видачу патенту та номер бюлетеня 27.05.2019, Бюл. №10;

- патент на корисну модель № 134691 «Пристрій для визначення високоточних параметрів маневру розходження суден при їх зовнішньому управлінні». Дата публікації відомостей про видачу патенту та номер бюлетеня 27.05.2019, Бюл. №10.

Особистий внесок здобувача. Дисертаційну роботу виконано здобувачем самостійно: проведено інформаційний пошук по темі дисертації та аналіз основних напрямків вирішення проблеми підвищення безпеки судноводіння, по темі дисертаційної роботи здійснено розробку методологічного забезпечення, здобувачем отримано рішення всіх задекларованих складових задач і їх синтезом досягнуто рішення головної задачі дисертації, ним також форма-

лізовані алгоритми, які необхідні для розробки комп'ютерної імітаційної програми, та впроваджені результати роботи в виробничий процес.

З наукових праць, опублікованих автором у співавторстві, в дисертаційній роботі використані лише ті положення, які належать йому особисто: формування принципів локально-незалежного і повного зовнішнього управління [164], структура стандартної та екстреної стратегій розходження [165], формалізація взаємодії суден при розходженні в разі його зовнішнього управління [166], методи вибору маневру розходження використанням областей неприпустимих значень параметрів руху суден [167, 154], концепція полікритеріального управління процесом судноводіння [171], характеристика специфіки управління суднами в стислих водах [173], обробка експериментальних даних по поворотності судна [174, 202], урахування динаміки судна при розрахунках параметрів повороту судна [175], визначення параметрів динамічної моделі поворотності судна по натурним спостереженням [176], формалізація взаємодії суден при компенсації зовнішнього збурення [178], урахування динаміки судна при маневруванні в стислих водах [179], процедура оцінки моменту часу попадання судна в ситуацію надмірного зближення [180], формування області курсів суден, які забезпечують безаварійне розходження [181], стратегія керування групою суден в ситуації небезпечного зближення [196, 151], процедура формування маневру розходження трьох суден зміною курсів [183, 149], залежність точності обсервації від суттєвих факторів [184, 208], спосіб вибору вектору оптимального управління для розходження суден [185, 216], вплив надмірних вимірювань на точність координат [186, 182], формалізація групи суден в разі їх зовнішнього керування [193], методи керування суден при небезпечному зближенні [188, 150], використання моделей обертального руху при описанні повороту [187], процедури формування областей небезпечних курсів і швидкостей [191], характеристика методів попередження зіткнення зовнішнім управлінням процесом розходження [194], формування і використання областей неприпустимих значень параметрів руху суден [195, 189], стратегія вибору сумісної зміни параметрів руху суден [160, 217], застосування електронних карт для

попередження зіткнення суден [201], забезпечення безпечних поворотів судна в прибережному плаванні [203], вдосконалення технологій управління суднами в районах контролю СУРС [205], формування маневру розходження декількох суден зміною курсів [206, 207], процедура визначення маневру розходження за допомогою області небезпечних курсів [209, 210], спосіб розрахунку меж швидкостей [211, 212].

Апробація результатів дисертації. Основні результати і положення роботи доповідалися, обговорювалися і були схвалені на науково-практичних, науково-технічних і науково-методичних конференціях: VI «Эффективная и безопасная эксплуатация морских судов и сооружений» (Севастополь, 2-4 жовтня 2013 р.), науково-технічна конференція «Судноплавство: перевезення, технічні засоби, безпека» (Одеса, 19-20 листопада 2013 р.), науково-технічна конференції «Морські перевезення та інформаційні технології в судноплаванні» (Одеса, 18-19 листопада 2014 р. та 19-20 листопада 2015 р.), Всеукраїнські науково-технічні конференції з міжнародною участю «Сучасні технології проектування, побудови, експлуатації і ремонту суден, морських технічних засобів і інженерних споруд» (Миколаїв, 20-22 травня 2015 р., 17-18 травня 2017 р.), науково-технічна конференція «Річковий та морський транспорт: інфраструктура, судноплавство, перевезення, безпека» (Одеса, 16-17 листопада 2016 р.), VI, VII, VIII, IX, X Міжнародні науково - практичні конференції «Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті (MINTT-2014, 2016, 2017, 2018)» (Херсон, 26-28 травня 2014 р., 26-28 травня 2015 р., 24-26 травня 2016 р., 23-25 травня 2017 р., 29-31 травня 2018 р.), науково-технічна конференція «Транспортні технології (морський та річковий флот): інфраструктура, судноплавство, перевезення, автоматизація» (Одеса, 16-17 листопада 2017 р., 15-16 листопада 2018 р.), The international Association of Maritime Universities (IAMU) Conference book. The 20th Commemorative Annual General Assembly (AGA 20) (Tokyo, Japan. 30 October – 1 November 2019).

Публікації.

За результатами виконаних досліджень автором опубліковано 62 наукові

праці (з них 20 одноосібно), в тому числі: включених до Переліку наукових фахових видань України - 15 статей [149, 169-179, 182, 196, 202], 1 стаття проіндексована у базах даних Scopus [187], в 3 монографіях [164, 166, 168]; 8 статей у вітчизняних наукових періодичних виданнях [154, 156, 180, 183-185, 191, 192]; 5 статей у наукових періодичних виданнях інших держав із напрямку, з якого підготовлено дисертацію [151, 160, 181, 186, 188], в зарубіжних наукових виданнях 10 наукових статей [150, 151, 160, 181, 186-189, 193-195, 197-201] та 2 монографії [165, 167]; в збірниках матеріалів наукових конференцій - 18 доповідей [190, 203-219].

Структура роботи. Дисертація складається зі вступу, семи розділів, висновків, списку використаних літературних джерел (226 найменувань) і додатків. Загальний обсяг роботи становить 510 сторінок та містить 273 рисунків, зокрема: 270 сторінок основного тексту, 26 сторінок списку використаних джерел, 214 сторінок додатків.

РОЗДІЛ 1.

ОСНОВНІ НАПРЯМКИ ВИРІШЕННЯ ПРОБЛЕМИ ПІДВИЩЕННЯ БЕЗПЕКИ СУДНОВОДІННЯ

1.1. Огляд та аналіз літературних джерел за проблемою забезпечення безаварійного плавання суден

Проведений попередній аналіз літературних джерел по проблемі забезпечення безаварійного плавання суден виявив актуальні напрямки її вирішення:

1. Застосування інформаційних технологій для забезпечення безаварійного судноводіння.

1. Підвищення точності визначення місця судна та розробка методів оцінки безпеки судноводіння в стислих умовах плавання.

3. Розробка методів та технічних заходів для забезпечення безпечного руху суден у районах інтенсивного судноплавства.

Точності контролю місця судна присвячені роботи [1-31], які визначають один із напрямків вирішення проблеми безпечного судноводіння в стислих умовах плавання.

Теорія випадкових похибок навігаційних вимірювань приведена у роботі [1], а в роботі [2] досліджено вплив точності визначення суднових координат на надійність навігації. Значний внесок в рішення проблеми підвищення точності контролю місця судна, і в першу чергу, розробку теоретичних методів зниження впливу систематичних і випадкових похибок вимірювань на точність обсервацій зроблено в роботах [3, 4].

Новий підхід до розробки моделі формування випадкових величин навігаційних вимірювань, що відрізняється від моделі запропонованої К. Гаусом для обґрунтування нормального закону, запропоновано в монографії [5]. В результаті в судноводінні крім закону Гаусу стали використовувати змішані закони розподілу вірогідності [6, 7]. Недоліком моделей змішаного розподілу є

не можливість їх застосовуватися для опису систем залежних випадкових величин.

Як показали дослідження, проблема опису систем залежних випадкових величин може бути вирішена за допомогою узагальненого розподілу Пуассона [8], який використовує базовий нормальний розподіл. Результати дослідження приведені в роботі [9] дають можливість опису систем залежних випадкових величин узагальненим розподілом Пуассона з базовим нормальним законом.

Можливість за допомогою методів кореляційної навігації забезпечення високої точності визначення місця суден в стислих районах плавання розглянута в статтях [10, 11]. Спосіб контролю місця судна багатопозиційною радіолокаційною системою оберненого типу запропоновано в роботі [12].

Аналіз вибірок випадкових похибок вимірювань навігаційних параметрів зроблено у роботі [13]. В ній доказано, що найбільша відповідність статистичного матеріалу з теоретичним розподілом відбувається для законів, відрізняючись від нормального. З робіт [14, 15] видно, що застосування методу найменших квадратів для розрахунку обсервованих координат судна не забезпечує можливості отримання їх ефективних оцінок. В роботах [16, 17, 18] показано, що для отримання ефективних оцінок обсервованих координат судна необхідно використовувати метод максимальної правдоподібності, який враховує дійсний закон розподілу похибок.

Аналізу різних підходів до оцінки точності визначення місця судна супутниковою радіонавігаційною системою присвячена робота [19]. Аналіз статистичних матеріалів точності визначення місця судна не підтверджує гіпотезу про розподіл випадкових похибок визначення широти і довготи за нормальним законом.

Задача утримання судна в заданому положенні при наявності управління тільки за даними сигналів про момент рискання і силі подовжнього зносу розглядається у роботі [20]. Для вирішення даної задачі в роботі запропоновано метод управління зворотним зв'язком який є змінним в часі і враховує

складову управляючої дії по інтегралу.

Питання законів розподілу вірогідності похибок навігаційних вимірювань початкової вибірки, яка є сумішшю часткових вибірок нормально розподілених похибок з різною дисперсією розглядаються у роботах [21, 22], в яких також одержана процедура оцінки ефективності обсервованих координат судна з урахуванням змішаних розподілів похибок початкової вибірки.

Результати дослідження в районі порту Щецін при використанні радіонавігаційної системи DGPS показали можливості застосування початкових поправок станції і довели доцільність їх врахування [23]. Одержані результати дослідження, як підтверджено в роботі, сприятимуть більш широкому застосуванню системи DGPS при плаванні суден в на підходах до порту Щецін.

В роботі [24] показано, що при визначенні місцеположення рухомого об'єкту системою GPS, виникаючі похибки корегуються диференціальними методами, однак із збільшенням відстані між користувачем системи від станції нульового відліку з часом поправки можуть виявитися недостатніми. Похибки зростають при збільшенні відстані між приймачем системи DGPS і базовою станцією. На кожні 150 км відстані від базової станції похибка зростає на 1 м. Через кожні 50 миль на північ і південь від станції відліку Sagres Broadcast Station уздовж побережжя Португалії були розміщені шість приймачів DGPS для оцінки реальної похибки приймача. Як витікає з отриманих даних, реальна похибка визначення позиції менша її теоретичного значення і складає на кожні 100 км 0,22 м відстані від станції відліку. За відсутності прямої видимості супутника в портах похибки можуть досягати більших значень.

Як показано в роботі [25], для заходу судна в порт, який розташований на відкритому морському узбережжі, при штормових умовах, існують навігаційні обмеження. Судно, яке входить в порт, через небезпечні зсуви щодо запланованої траєкторії, при сильному хвилюванні може зіткнутися з хвилеломом. Були розроблені індекси оцінки безпеки входу в порт, з використанням бази натурних досліджень траєкторій руху судна.

В публікації [26] викладена стратегія формування радіонавігаційного поля на території РФ, яка враховує комплекс обмежень, що визначені міжнародними вимогами, значною протяжністю і значними відмінностями внутрішніх водних шляхів різних регіонів.

При наявності нерівноточних корельованих похибок положення меж фарватеру в роботі [27] були отримані аналітичні вирази для оцінки вірогідності навігаційної безпеки плавання. Причому достовірність одержаних залежностей підтверджена методом статистичного моделювання.

Методика підготовки бібліотеки маршрутів пропонується у роботі [28]. Ця методика дозволяє створити маршрут плавання і дає можливість штурманському складу контролювати поточне положення місця судна відповідно до заданої траєкторії руху з високою точністю, яка забезпечується диференціальною підсистемою без використання електронних карт.

При використанні бази теоретичних розробок і їх зіставлення з вимогами Міжнародної морської організації по точності судноводіння в роботі [29] запропоновані розрахункові методи визначення значень допустимих величин середніх квадратичних похибок навігаційних параметрів для забезпечення безпеки плавання в різних зонах руху.

У роботах [30, 31] приведені моделі для оцінки вірогідності безпечного плавання в стислих районах. В них обмеженість виражається у вигляді розподілу частот бічних відстаней від середини фарватеру до його меж, де при відомій щільності розподілу похибки бічного відхилення судна і тривалості маршруту розраховується вірогідність безпечного плавання заданим маршрутом.

Закони розподілу вірогідності, яким можуть бути підлеглі похибки вимірювань навігаційних параметрів розглянуто у роботі [16]. В ній досліджується методи розрахунку обсервованих координат, залежність точності обсервованих координат від точності і числа ліній положення та закон розподілу їх похибок. Аналітичні вирази оцінки ефективності обсервованих координат, які розраховані методом найменших квадратів, отримані при наявності надмір-

них ліній положення. Коректність отриманих аналітичних виразів підтверджена за допомогою комп'ютерного імітаційного моделювання. Для 12 вибірок випадкових похибок навігаційних вимірювань, які були здобуті в умовах натурних спостережень, визначено закони розподілу вірогідності. Ці закони в своїй більшості відносяться до змішаних законів обох типів.

Методам моделювання руху судна в стислих умовах навігації, які сприяють виконанню суднами маневрів, що забезпечують більш ефективний і безаварійний процес судноводіння, присвячені публікації [32-83].

Навігаційно-інформаційній системі (НІС) судна, як зазначається у роботі [32], належить значна роль у забезпеченні безпеки судноводіння. В роботі представлені відомості про НІС та електроні карті, наведені характеристики складових частин, розглянуто принципи відображення інформації НІС, їх функціональних можливостей та приведені їх обмеження та недоліки.

В публікації [33] розглянуті питання комплектування сучасних інформаційних технологій управління рухом суден в регіональних структурах на внутрішніх водних шляхах, їх зв'язок з супутниковими системами високоточного визначення місця.

В роботах [34, 35, 36] розглянуто високоточне управління судном в стислих районах, причому в роботах [35, 36] приведені моделі повороту судна з урахуванням процесу перекладання пера керма.

У роботі [37] приведені результати розробки інформаційної системи імітаційного моделювання руху суден, де використовуються складні динамічні моделі. В даних моделях враховуються залежності параметрів руху судна від кута кладки керма і оборотів двигуна. Цією системою забезпечуються новий тип планування маневрів судна і контролює реалізацію завданого маневру. Причому при маневруванні судна передбачається відображення заданих маневрів одночасно з фактичним рухом судна та індикації прогнозованої траєкторії.

В роботі [38] запропоновані маневрені характеристики та коефіцієнти впливу параметрів математичної моделі судна, до них відносяться початкова

поворотність, радіус сталої циркуляції та всі характеристики одержування.

В роботі [39] розглянуті питання оцінки, прогнозу і оптимізації процесу судноводіння бортовими автоматизованими системами. Розглянуто методи прогнозу судноводіння та принципи вибору штурманом рішень для забезпечення безаварійного плавання судна в штормових умовах, наведені особливості відображення інформації.

В публікації [40] вводиться поняття послідовності маневрів (ПМ), під яким розуміється набір елементарних управляючих дій на великотоннажне судно, необхідних для виконання технологічних операцій судноводіння, наприклад, постановка на якір та зняття з нього, швартування і т.д. ПМ формується в результаті аналізу і синтезу окремих маневрів на базі математичної моделі руху судна і достатнього досвіду маневрування.

Синтез алгоритму управління рухом судна, при його стабілізації на заданій траєкторії за комплексним економічним критерієм і критерієм точності з урахуванням нелінійної моделі і виникаючих збурень розглянуто у роботі [41]. Для ідентифікації математичної моделі судна здійснена багатоальтернативна фільтрація із застосування лінійно-квадратичного методу.

У роботі [42] використанні новітні технічні пристрої для нових способів управління судном. Вони в найкоротший час забезпечують виконання заданих маневрів. Приведені результати дослідження, яке виконані співробітниками Технічного науково-дослідного інституту (Японія). Класичний метод варіаційного числення використаний для аналітичного опису задачі виконання заданого маневру в найкоротший час. Рішення задач реалізації різних типів маневрів одержано для зупинки судна, що йде своїм ходом, в заданій позиції за найкоротший час. Також описується спосіб виконання маневру за допомогою керма, носового і кормового підрульового пристрою (ПП). На учбовому судні «Сиоміті мару», оснащеним носовим і кормовим ПП, проводилися випробування, які підтвердили ефективність способів виконання маневрування в найкоротший час.

В роботі [43] пропонується уніфікована математична модель руху для рі-

зних типів морських об'єктів, що рухаються з постійною швидкістю. Запропонована модель нелінійного матричного диференціального рівняння. Його аналіз визначає вимоги до систем управління морськими об'єктами, що рухаються. Ці вимоги сформулюються в якості задач оптимального управління.

Запропонована в роботі [44] структура дворівневої системи управління рухом швидкісних суден складається зі стратегічного і виконавчого рівнів. Дана структура дворівневої системи використовуються для двох типів швидкісних суден. Робота визначає її склад та підходи щодо проектування підсистем керування системою.

Метою кандидатської дисертації [45] є підвищення якості автоматичного управління річковим судном при перекладці на заданий курс шляхом нових ефективніших алгоритмів управління і настройки авторульового. Методи, на основі яких побудований адаптивний по швидкості астатичний регулятор стану, формують закон управління і розглядаються в роботі [46].

У патенті [47] пропонується спосіб відображення руху суден, який заповідає посадкам суден на мілину та використовується в системах управління рухом суден в морських каналах і вузькостях. Передачі, прийом і фіксації кутових координат суден по енергетичних екстремумам сигналів радіовипромінювачів; перетворення координат суден в прямокутну систему координат з відображенням на екранах індикаторів і являється суттю запропонованого винаходу.

Для судна, що виконує маневр виходу на новий курс та одночасно розгоняється, в роботі [48] для зміни параметрів руху судна пропонується аналітичний опис. Використання запропонованої математичної моделі дає можливість істотно скоротити кількість натурних експериментів, необхідних для її адаптації. В цій роботі запропоновано алгоритм для визначення прогнозованої траєкторії руху великотоннажного судна під час зміни його курсу і під час зйомки з якоря.

Математична модель руху судна при його заході в камеру шлюзу обгрунтовується в роботі [49]. Особливістю запропонованої моделі керовано-

сті в тому, що гідродинамічні характеристики залежать додатково від взаємної позиції судна відносно шлюзу, а уточнене рівняння руху судна пропонується в роботі [50].

В статті [51] розглянуто розробку системи управління курсом судна автопілотом з використанням принципів нечіткої логіки, причому в статті розглядається адаптація системи з урахуванням складної динаміки та нелінійності математичної моделі судна.

Використання нейронних мереж у сучасних системах управління складними динамічними об'єктами для формування керуючих сигналів розглянуто в роботі [52]. До класу таких невизначених об'єктів відносяться морські судна.

Математичний апарат, необхідний для налаштування математичної моделі руху судна при зміні курсу, запропонований у роботі [53]. В результаті інтегрування класичної системи диференціальних рівнянь отримані залежності для зміни кутової швидкості та кута дрейфу при повороті. Дані залежності вимагають ідентифікації коефіцієнтів за результатами натурних випробувань. Для цього використаний метод найменших квадратів для нелінійних залежностей.

Патент на пристрій для управління подовжнім рухом судна представлений у роботі [54], який відноситься до систем автоматичного управління подовжнім рухом судна і підвищує точність роботи контуру управління судном. Складовою частиною пристрою управління рухом є датчики кутової швидкості повороту судна і кута перекидання керма, пристрій установки шляхового кута, приймач супутникових навігаційних систем та автоматичний регулятор шляхового кута.

Задача утримання в заданій точці за заданим курсом морського об'єкту, як нелінійна задача управління, описана в роботі [55]. Оцінка поточного стану системи проводиться синтезом алгоритму нелінійного фільтру Кальмана з локальними ітераціями з формуванням необхідного закону керування. Результати проведеного моделювання показують можливість утримання судна з точ-

ністю не більше 4-8 м відносно завданої точки при стабілізації курсу до 2° .

Створення швидкодійних ЕОМ, як наголошується в статті [56], дозволило застосувати на практиці контролери із змінним коефіцієнтом посилення в управлінні різними механізмами в реальному часі. Як показано у статті, за допомогою такого контролера для управління судновим кермом можна використовувати алгоритм Брайсона-Хо. У роботі приведені основи теорії автоматичного регулювання для забезпечення безперервного управління апаратним і програмним терміналами та способів такого управління забезпечення стійкості судна на заданому курсі. Також розглянуто лінійну математичну модель руху судна при маневруванні та задачу зміни курсу судна при релейному управлінні.

Програма і дані статистичного моделювання процесу руху суден лінійним фарватером приведені в роботі [57]. Виявлено вплив параметрів навігаційних умов плавання на кількість ситуацій небезпечного зближення.

В роботі [58] показано, що рішення системи диференціальних рівнянь руху судна, які описують керованість судна, можливе при достатньо загальних припущеннях про характер сил і моментів, що діючих на судно. Це стало результатом вивчення аерогідродинамічних сил, що діють на корпус судна, в експериментах виконаних в басейнах ЦНДІ ім. акад. А.Н. Крилова. Через нелінійну залежність діючих на корпус судна сил від швидкості руху судна на криволінійній траєкторії можливий рух судна, як в бік перекладання керма, так і в протилежний напрямок. Визначення можливих випадків положення рівноваги системи може бути виконане методами нелінійної механіки для конкретних умов і режимів руху.

У роботі [59] розглянуто дві задачі оптимізації при розробці моделей морського руху: оптимізація параметрів водних шляхів для певного вибраного судна і завданих гідрометеорологічних умов; оптимізація параметрів судна для певних завданих параметрів водних шляхів і гідрометеорологічних умов. Для вирішення сформульованих задач оптимізації використовуються методи електронного і математичного моделювання руху суден і водних шляхів. Рі-

шення цих задач досягається використанням матеріалів статистичної обробки модельних випробувань. Вони ґрунтуються на проведенні серії проб для чисельного підтвердження досліджування конкретного судна або варіантів водних шляхів. Методи імітаційної оптимізації, які розроблені в Інституті морської навігації Щецинської вищої морської школи, дозволяють включити численні розрахунки для конкретних варіантів в проектно-конструкторських бюро.

В статті [60] розглянуто властивості лінійних моделей маневрування суден та налаштування моделі повної версії. В ній також представлені нові результати відносно властивостей лінійної динаміки судна.

Теорія управління динамічними об'єктами зі змінними параметрами з позицій синергетики викладена в роботі [61], в ній розглянуті архітектура нейромережей, опис застосування нечіткої логіки для управління та традиційних системи управління. Приведені приклади синтезу нейромережевих систем управління.

В роботі [62] описаний метод синтезу коригуючих пристроїв системи управління динамічним об'єктом. На підставі рішення системи лінійних рівнянь запропоновані процедури визначення параметрів передавальних функцій, які відповідають змішаним вимогам.

Методика оцінки особливостей управління судном при прямованні по фарватеру приведена у роботі [63], причому методика враховує скупчення суден на фарватері, маневрені характеристики та характеристики керованості судна, конфігурацію фарватеру, впливи вітру і течії, персональні якості судноводія, а також наявність вільної акваторії. Для дослідження використовувався тренажер по управлінню судном. В роботі приведені методика, результати виконаного дослідження та розроблена оцінка особливостей управління судном при плаванні по фарватеру.

В статті [64] розглянуто формування моделі керованого руху судна. Воно пов'язане із значними труднощами під час моделювання складних умов плавання: нерегулярної хитавиці, мілководдя, поривчастого вітру та інших не-

сприятливих факторів. Це особливо важливо для маневрених тренажерів з при використуванням математичної моделі судна для проектування водних шляхів.

Алгоритм управління рульовим приводом в умовах нестабільних характеристик, до яких відносяться швидкість обертання валу, люфт та величина зони нечутливості, приведений у роботі [65]. Управління формується алгоритмом у момент надходження сигналу на переключання керма, який надходить від головної управляючої програми авторульового. За наслідками попередніх експериментів визначається момент часу зняття управляючого сигналу, після чого запам'ятовуються необхідні параметри. Дана інформація є характеристикою ситуації та запам'ятовується в базі даних.

Техніко-експлуатаційні вимоги Міжнародної морської організації (ІМО), Міжнародної електротехнічної комісії (МЕК) і Міжнародної організації по стандартизації (ІСО) до систем автоматичного управління судном по курсу і траєкторії представлені в роботі [66], в якій приводиться короткий аналіз підготовлених змін до діючої Конвенції по охороні людського життя на морі «СОЛАС-74», а також Резолюції А.342 (9) Комітету безпеки на морі ІМО, що міститься технічні і експлуатаційні вимоги до авторульових.

В публікації [67] описана електронна система інформації про стан фарватеру ARGO, яка є проектом телеметричних служб федерального Міністерства водного транспорту Німеччини, що використовує електронні карті річок, на яку накладаються поточні радіолокаційні зображення. Вони поєднуються з наявною інформацією про глибини на різних ділянках водного шляху. Ця інформація виводиться на монітор, чим інформуються судноводії про стан і глибини фарватеру на момент слідування судна.

В роботі [68] описаний метод вибору моменту подачі команди рульовому на зміну курсу судна при його прямованні у вузкостях, в основу якого покладено використання даних про відстань між точками перетину поточної і нової ділянок траєкторії до точки початку повороту судна. Вони завчасно визначаються та залежать від кутів переключання керма і швидкостей ходу судна. Пе-

ревірка запропонованого способу проводилася при плаванні судна «Тайсэй-мару» у Внутрішньому Японському морі. Приведено аналіз результатів одержаних під час експерименту даних і результати моделювання зміни курсу судном із застосуванням нового способу.

Автоматичне управління рухом судна по заданому курсу з постійним кутом дрейфу розглядається в публікації [69], при цьому при швартуванні судна також завдається швидкість бічного руху з одночасною стабілізацією заданого курсу. У роботі приводяться закони управління рухом судна, які визначаються тим, що система стабілізації судна повністю спостережувана і керована, за рахунок чого підвищується ефективність роботи існуючих авторульових.

Результати дослідження динамічної моделі руху судна під впливом додаткових нелінійних членів описані в роботі [70]. Проведена оцінка адекватності прийнятої моделі на різних режимах руху, в результаті чого виявлено вплив зміни сили та напрямку вітру на картину біфуркації. Введенням інтелектуальної складової до алгоритму функціонування авторульового досягнуто істотне підвищення його ефективності.

В роботі [71] розглянуті питання ідентифікації суднових моделей маневрування, з використанням яких проводиться проектування систем управління рухом суден, досліджується маневреність судна, а також забезпечується розвиток систем управління судновими тренажерами. В дослідженні запропонована нелінійна модель маневрування судна, що розроблена на основі аналізу гідродинаміки. Для розрахунку її параметрів пропонується алгоритм, заснований на розширеній теорії фільтра Кальмана, синтезований з використанням теорії ідентифікації систем.

В роботі [72] розглянуто процедуру розрахунку приєднаних мас самохідних транспортних суден, яка більш адекватно описує рух судна при здійсненні різних експлуатаційних маневрів. Отримана математична модель оптимізує маневрування суден в умовах обмеженого суднового ходу та забезпечуючи необхідну безпеку плавання.

Як відзначається в роботі [73], значне зростання вантажопідйомності сучасних суден вимагає необхідність використання вдосконалених навігаційних комп'ютерних систем для забезпечення безаварійного плавання. Існуючі системи частіше всього використовують застарілі та спрощені прогнозні моделі руху суден. Однак такі моделі прогнозів суттєво обмежують їх використання при поточному відображенні руху судна при зміні його параметрів, пов'язаних з положенням керма та обертами двигуна. Тому необхідне забезпечення підвищеної точності реалізації криволінійної траєкторії руху судна більш сучасними прогнозними моделями.

Оптимізація параметрів водних шляхів математичними моделями у вигляді цільових функцій розглянуті в роботі [74], за допомогою яких проводилося імітаційне моделювання, причому представлені результати оптимізації повороту на фарватері Свіноуйсце – Щецін та західному поромному причалі Центрум в Свіноуйсце.

В роботі [75] по результатам проведеного аналізу пропонується управляючий пристрій, що забезпечує краще маневрування судна з використанням ручного приладу управління і працює на найменшому ході. Також у статті обговорюється новий універсальний метод проектування системи управління шляхом застосування вагової матриці енергетичного розподілу.

Робота [76] присвячена динамічному контролю і усуненню перешкод при адаптивному зворотному регулюванні. В ній показано, що поліпшена діаграма зворотного адаптивного регулювання Adaptive inverse control (AIC). Вона є узгодженою з характеристиками моделі судна. Метод найменших квадратів використовується для проектування і ідентифікації контролера алгоритм коректування діаграми. Можливість застосування AIC для зміни моделі судна на іншу підтверджена моделюванням. Результати управління також поліпшуються в порівнянні з методом PID.

Сучасні судові авторульові з ПІД регулятором поступаються за якістю ручному управлінню яке виконує досвідчений судноводій, на що вказується у роботі [77], в якій запропоновано поліпшення якості управління рухом суд-

на на заданому курсі в разі урахування в алгоритмі управління раніше невідомі особливості нелінійної динаміки судна.

В статті [78] запропоновано контролер штучної нейронної мережі для автоматичного причалювання суден. Для його послідовного навчання запропоновано концепцію мінімізації часу маневру швартування. Оцінка ефективності запропонованого контролера проводилася після завершення його навчання в нейронних мереж моделюванням методом Монте-Карло. За допомогою контролера, в цілях забезпечення безпеки, судно виводиться в фінальну позицію на деякій відстані від пірсу.

Як повідомляється в статті [79], у Токійському університеті торгового флоту з використанням теорії самоналагоджувального управління призначенням полюсів автоматизованих систем управління запропоновано адаптивний авторульовий, що ураховує маневрені характеристики судна і поточні умови плавання.

В робота [80] описується ідентифікації параметрів моделей маневрування суден, де використовується метод рекурсивного найменшого квадрату на основі векторних машин підтримки. В ній указується, що ідентифікація системи в поєднанні з повномасштабним або вільним модельним тестом вважається основним підходом до оцінки моделей маневрування суден серед декількох інших альтернативних підходів. Рекурсивний метод найменших квадратів (RLS), застосовуються для он-лайн ідентифікації моделей маневрування суден.

Декомпозиція емпіричного режиму і метод Wavelet застосовуються для фільтрації даних, спотворених шумом. У статті аналізується і обговорюється визначення номера вибірки для SVM з метою отримання початкових значень ідентифікованих параметрів.

Як вказується в роботі [81], фірма «Фуруно денки» (Японія) запропонувала систему підтримки прийняття рішень при управлінні рухом морських суден, в якій передбачена взаємодія з кінематичними глобальними системами позиціювання, що функціонують у реальному часі. Рух суден ефективно відс-

тежується за допомогою радіолокаційної станції.

Інтелектуальну систему прогнозу руху судна описано в роботі [82], яка імітує процес навчання автономного блоку управління, який створено за допомогою штучної нейронної мережі. Блок управління по вхідним сигналам обчислює необхідні параметри маневрування судна в стислих водах. Завданням системи є як контроль параметрів руху судна та і прогноз значень після певного інтервалу часу накопичення.

В статті [83] приведено опис проектування системи інформації і управління судноплавством VTMISS в турецьких протоках. Відмічається, що імітація і моделювання руху суден значно сприяють зростанню ефективності судноплавства і безпеки в стислих водах з інтенсивною навігацією. У статті розглядається модель імітації потоку суден і управління судном, як і моделі прогнозу гідрографії. Умови стану зовнішнього середовища і інтенсивність транспортного потоку враховуються в математичній моделі. Допускається проходження не більш 5 тис. суден в місяць за умов безпеки у турецьких протоках. В завершення статті обговорюються використання імітаційних програм для запобігання аварій на морським шляхах.

В роботі [84] розглянуто дві концепції управління суднами в ситуації небезпечного зближення. Першою являється локально-незалежна концепція, згідно якій кожне з суден приймає рішення про свій власний маневр розходження в рамках регламентуючий правил попередження зіткнень, якими на даний час являються Міжнародні правила запобігання зіткненню суден (МППЗС-72) в частині маневрування суден. В них вибирають маневр виходячи з ситуації зближення з кожним із суден та не враховують ситуації зближення між іншими цілями.

Друга концепція передбачає повне зовнішнє управління системою суден, що небезпечно зближуються. В ній враховуються всі парні ситуації зближення суден та визначають загальну стратегію розходження даної групи суден, де включені їх взаємоузгоджені маневри.

Для обох концепції управління суднами при небезпечному зближенні

розроблені процедури вибору оптимальних безпечних стратегій розходження. Вони також враховують навігаційні небезпеки в районі маневрування суден і динаміку судна, що маневрує. За допомогою комп'ютера проведене імітаційне моделювання запропонованих методів управління суднами при небезпечному зближенні.

Зараз основним методом розходження суден є їх локально-незалежне управління в ситуації небезпечного зближення, тому що він історично сформувався, як інструмент попередження зіткнення суден, в процесі розвитку судноводіння. Тому основні дослідження по питанням попередження зіткнення суден присвячені розвитку даного методу. Далі розглянемо основні роботи в цьому напрямку.

Формалізація процесу розходження суден, як взаємодія конфліктуючих сторін на ґрунті перетину інтересів економічності руху, представлена в роботах [85-88]. В роботі [85] вперше розглянута спроба формалізації процесу розходження судна із декількома цілями за допомогою методів теорії оптимального управління з урахуванням вимог МПЗЗС-72. В роботі запропонована система управління, яка складається з моделі динамічного стану керованого судна та алгоритму пошуку безпечного маневру і за допомогою якої прогнозується рух судна і небезпечних цілей для заданих збурень та різних керуючих діях. У цьому випадку для прийнятого критерію оптимальності можливо визначити необхідні керуючі дії з урахуванням розглянутої в роботі формалізації вимог МПЗЗС.

Формалізація процесу розходження альтернативним підходом сформувався з появою теорії позиційних диференційних різницевих ігор, який заснований на застосуванні теорії ігор. Тому початкова модель була значно доповнена, що знайшло своє відображення в роботах [86, 87]. Запропонована математична модель аналітично описує судно і всі цілі як динамічну систему, поточний стан її описується фазовим вектором, що змінюється в часі відповідно до диференціальних рівнянь руху. Задача знаходження оптимальних значень стратегії розходження, розглядається в термінах лінійного програмування, що

виникає необхідність лінеаризації нелінійних обмежень. В цей же час застосування диференційних ігор до формалізації процесу розходження також детально викладено в роботі [88].

Недоліком розглянутої моделі формалізації процесу розходження суден з позицій теорії позиційних диференційних різницевих ігор є допущення про антагоністичні відношення між суднами при розходженні. Навпаки, обидва судна прагнуть уникнути можливої загрози зіткнення.

Формалізація МПЗЗС за допомогою алгебри логіки викладена в роботі [89]. Запропоновано три області в системі координат, осями яких є час і дистанція найкоротшого зближення. При попаданні судна до кожної з областей реалізуються взаємодії обох суден відповідно до вимог МПЗЗС.

В роботах [90, 91] досліджено процес розходження судна з поодинокую ціллю без урахування навігаційних перешкод і інерційних характеристик судна, що маневрує, а в той же час параметри руху зустрічної цілі залишаються незмінними. В роботі одержані аналітичні вирази для опису допустимих областей безпечних курсів і швидкостей суден, що виконують маневрування, в залежності від їх початкового відносного положення і параметрів руху. Задача в запропонованій постановці вирішується коректно методами оптимального управління.

В запропонованій моделі не враховано динамічних характеристик судна при визначенні параметрів маневру розходження, що є її недоліком.

Формування оптимального управління судном при розходженні методами теорії оптимальних дискретних процесів запропоновано в роботі [92] з припущенням про відсутність зовнішніх збурень і постійність параметрів руху зустрічних суден. Для пошуку локально оптимальної безпечної траєкторії розходження судна з цілями застосовується ЕОМ. Для її розв'язання наводиться алгоритм чисельного рішення, що використовує апарат теорії оптимальних дискретних процесів.

В розглянутій роботі робиться припущення, що при розходженні керованою зміною є кутова швидкість базового судна, тобто судно має рухатися

змінним курсом з визначеною кутовою швидкістю. Така постановка задачі не відповідає вимогам МПЗЗС, згідно яким під час розходження курс ухилення має бути незмінним.

Питанням розробки аналітичного апарату визначення реалізованої області взаємних обов'язків суден, які небезпечно зближуються, присвячені роботи [93, 94]; в роботах запропоновано процедури визначення граничної допустимої дистанції найкоротшого зближення між суднами. В роботах [95, 96] розглянуті питання оцінки небезпечності ситуації розходження суден, причому в роботі [95] запропонована процедура формалізації контролю поточної ситуації і прийняттю рішень по її управлінню. Також в роботі [96] розглянуті різні аспекти відображення ситуації розходження суден.

Роботи [97-100] присвячені застосуванню методу нелінійної інтегральної інваріантності, який викладений в монографіях [98, 97], для аналітичного опису процесу розходження і розробки системи попередження зіткнень суден. Метод нелінійної інтегральної інваріантності, згідно роботі [98], дозволяє формувати стратегію управління динамічною системою, що забезпечує інваріантність деяких фазових координат керованої системи щодо поточних зовнішніх збурень. В якості таких збурень в задачі розходження розглядається $2n$ -мірний вектор курсів і швидкостей зустрічних цілей, що ускладнюють рух судна. У даній задачі відстані від судна до зустрічних цілей запропоновані інваріантними координатами. Як вказано у роботі, за допомогою згаданого методу знаходиться допустима область безпечних стратегій судна, яка виходить з можливих найгірших для маневру розходження значень параметрів руху кожної зустрічної цілі.

Таке ствердження являється сумнівним, особливо в ситуації, коли швидкість зустрічної цілі більша швидкості базового судна. Більш того, розглянутий метод базується на допущенні антагоністичних відносин між суднами в процесі їх розходження.

У роботах [99, 100] пропонується процедура врахування та алгоритмізації МПЗЗС-72 при виборі однокрокових стратегій розходження. В цих робо-

тах описана система парних відносин на множині всіх спостережуваних цілей та запропоновані композиції, породжуваних ними функцій. Також визначається ціль, відносно якої необхідно вирішувати задачу розходження, і виділяється множина цілей, що небезпечно зближуються з нею.

Складні ситуації небезпечного зближення в стислих водах розглянуті в роботі [101], в яких при обмеженій пропускній здатності сприйняття інформації судноводієм неможливо провести переробку її необхідного об'єму, що значно ускладнює прийняття правильних рішень.

Як зазначається в роботах [102, 103], реалізація запропонованих теоретичних концепцій створення систем формування безпечного маневру пов'язана із значними труднощами при визначенні множини допустимих маневрів розходження, які відповідають вимогам безпечного розходження з цілями, врахування навігаційних перешкод, а також не суперечать МПЗЗС-72. В роботах запропоновано процедури окремого врахування кожного з перелічених обмежень, на основі яких розроблено метод їх спільного врахування.

Перспективи використання на містку сучасних технічних засобів для керування суднами в стислих умовах плавання з ціллю попередження зіткнень розглянуті в роботі [104], а в публікації [105] розглянуто питання вибору оптимального курсу для розходження суден при криволінійному русі. В роботі [106] описані важливі питання проблеми безпечного розходження суден та шляхи їх можливого вирішення.

У публікаціях [107-111] присвячені докладним дослідженням ситуації небезпечного зближення пари суден і визначення умов існування множини безпечних маневрів розходження. У згаданих роботах також розглянуто процедуру вибору оптимального маневру де критерієм є втрата ходового часу. Аналіз результатів імітаційного моделювання процесу розходження суден проведено в роботі [109], на основі якого наведені недоліки МПЗЗС-72 стосовно маневрування суден в ситуації небезпечного зближення.

Визначення параметрів маневру безпечного розходження суден де враховується інерційність при здійсненні повороту розглянуто в роботах [112-118] з

використанням різних моделей обертального руху судна. Приведена найбільш проста модель повороту з постійною кутовою швидкістю судна, та більш складні моделі при використанні диференціальних рівнянь другого та третього порядків відносно поточного курсу судна. В роботі [118] запропонована процедура розрахунку характеристик поворотності судна по матеріалам натурального експерименту. Результати імітаційного моделювання процесу розходження з урахуванням динаміки суден приводяться в роботі [117].

В роботах [119-121] розглянуто визначення параметрів безпечного маневру розходження судна з ціллю з урахуванням навігаційних перешкод. Формалізацію навігаційних перешкод запропоновано в роботі [119] для їх урахування при виборі маневру розходження в задачі попередження зіткнення суден. В роботі [121] одержана з урахуванням наявності навігаційних перешкод в районі маневрування умова існування множини допустимих маневрів розходження суден, що зближуються, а в роботі [120] приведено рішення задачі розходження суден з урахування лінійної навігаційної перешкоди.

Розглянутий підхід урахування навігаційних перешкод являється складним, який потребує формалізації графічних меж перешкод, і розробки процедур вводу формалізованих масивів в систему попередження зіткнень суден

Робота [122] присвячена визначенню параметрів динамічної моделі обертального руху судна за натурними спостереженнями, а у монографії [123] приведена стратегія розходження суден в морі шляхом зміщення на паралельну лінію шляху під тим чи іншим кутом до лінії вихідного курсу. Оптимальна стратегія вибирається з множини варіантів, які можливі для розходження, по комплексному критерію, який враховує вимоги до завчасності, безпеки, економічності та помітності маневру для запобігання зіткнення.

Роботи [124, 125] стосуються дослідження питань екстреного маневрування суден для розходження в ситуації надмірного зближення. В публікації [124] викладено формування стратегії розходження суден в такій ситуації. При визначенні параметрів маневру розходження в ситуації надмірного зближення з урахування кутової швидкості судна розглянуто в роботі [125].

Проблему безпечного розходження з урахуванням особливостей їх взаємодії розглянуто в роботі [126], показано, що взаємодія виникає при небезпечному зближенні суден та визначає взаємні обов'язки в процесі розходження. В роботі проведена формалізація бінарної координації, що регламентує взаємодію суден згідно з МПЗЗС-72, а стратегію екстреного розходження запропоновано при надмірному зближенні суден в ситуації невизначеності їх подальшої поведінки й відсутності координації.

В статті [127] повідомляється, що з метою підвищення безпеки та ефективності управління суднами розроблена система Autonomous Traffic Management System (ATSM) з використанням даних AIS судна-тренажера «Shioji Maru» та дані радіолокаційного спостереження про переміщення суден в Токійській затоці, які використовуються для оцінки умов судноплавства. Розрахунок оптимальних траєкторій переміщення всіх суден в районі являється наступним етапом роботи системи ATSM, для чого використовуються програми Forward Dynamics Programming. Повідомляється, що при використанні оптимального шляху, визначеного системою ATSM, час входу в Токійську затоку скорочується до 4%.

Формуванню судової безпечної зони присвячені публікації [128, 129], у яких запропоновані математичні моделі містять системний облік істотних факторів, які орієнтовані на практичне використання в різних умовах плавання судна.

На жаль в роботах не міститься відомостей про застосування судової безпечної зони для вирішення задачі вибору параметрів маневру розходження в залежності від форми зони.

В роботі [130] розглянуто координованість бінарних взаємодій, як характеристик взаємодій суден в разі їх небезпечного зближення, та їх ефективність, для розрахунку чисельної оцінки якої отримано аналітичні вирази. Для групи суден, що небезпечно зближуються, запропоновано математичну модель їх взаємодії при різних типах управління.

У роботі [131] показано, що основним показником попередження зітк-

нень суден є індекс ризику зіткнення. У роботі аналізуються переваги та недоліки при використанні різних методів розрахунку індексу ризику зіткнення суден. На основі комплексної площини розглянуто модель оцінки ризику зіткнення суден, згідно якої розрахунок індексу ризику зіткнення будується у вигляді тривимірного зображення просторової кривої. Для реалізації запропонованої моделі необхідний одиночний мікрокомп'ютерний чіп, який доцільно використовувати для забезпечення безаварійного процесу судноводіння в системі прийняття рішень.

Віртуальні області застосовані для забезпечення безаварійного плавання в стислих водах і розглянуті у роботах [132, 133], причому спосіб формування безпечної області в суднових системах навігаційної інформації викладено в роботі [133], а процедура відображення віртуальної безпечної області судна на електронній карті розглянута в роботі [132].

Запропонований метод розходження судна з декількома цілями передбачає використання лише маневру зміни курсу причому без урахування динаміки суден.

У статті [134] розглядається контроль і управління рухом судна, як багаторівневої системи, що управляє судновими системами при його переході між портами. В приведеній системі функціональні шари контролю відповідають судовим підсистемам.

Формалізація і рішення задачі вибору оптимального маневру розходження являється дуже складним завданням, шляхи вирішення якого показані в роботах [135-137], в яких зазначається, що процес управління рухом судна є багатовимірним з нелінійними і нестационарними характеристиками, а задача носить ігровий характер.

У статті [138] запропоновано базову модель процесу безпечного управління судном у ситуації небезпечного зближення із використанням моделі гри декількох об'єктів, яка включає у себе обмеження змінних стану, нелінійні рівняння стану та нелінійні, що змінюються в часі. Також формалізована якість індексу управління грою у формах гри інтегральної оплати та остаточного

платежу. Як модель управління процесом розходження в першому наближенні прийнята модель багатокрокової матричної гри у вигляді двоїстої задачі лінійного програмування. У програмному забезпеченні Matlab/Simulink, для визначення безпечної траєкторії власного судна, була розроблена комп'ютерна програма ігрового управління GSC, причому одержані аналітичні результати були підтверджені та перевірені прикладами комп'ютерного моделювання із використанням програми GSC з метою визначення у реальній навігаційній обстановці безпечної траєкторії руху судна.

Недоліком ігрової моделі являється чисто теоретичний її характер і невідомість в реалізації моделі. Також застосування критеріїв інтегральної оплати та остаточного платежу в задачі визначення параметрів маневру розходження викликає сумнів.

В статті [139] описані штучна нейронна мережа синтезу безаварійного управління суден при небезпечному зближенні та шість методів оптимальної теорії ігор. Показано, що при застосуванні оптимальних алгоритмів керування методами теорії ігор є можливість визначення безпечної траєкторії власного судна при розходженні з іншими суднами для умов гарної та обмеженої видимості. Теоретичні результати статті були проілюстровані прикладами комп'ютерного моделювання ситуації зближення судна із 8-ма зустрічними цілями, для якої були визначені безпечні власні судові траєкторії руху.

В роботі [140] розглянуто оціночну систему дій для ухилення від зіткнення з поодиноким судном. В ній описується моделююча схема трьох рівнів, що базується на технології синтезу. Принцип дії модулів, які описують траєкторію і параметри руху судна, базується на перетворенні координат в геометричній моделі, завдяки чому визначаються оцінка ризику зіткнення, параметри маневру, і дії щодо ухилення від зіткнення.

Аналіз МПЗС-72 щодо запобігання зіткненню суден на морі приведено в публікації [141], зокрема коментуються положення Правил 17 пункти 2 і 3. В даній роботі обговорюється можливість застосування принципу - Principle of Confidence при спільних діях (Cooperated action) коли виникла ситуації

ухилення від зіткнення при розборі випадку в Морському арбітражному суді. Враховуючи, що розміри і швидкості суден збільшилися, і потрібно більше часу і більшу відстань до їх повної зупинки, запропоновано, що б пункт 2 Правил 17 мав перевагу перед пунктом 3.

Теоретичне обґрунтування та принцип дії автономної суднової системи ухилення від зіткнення викладається в роботі [142]. Також розглянуто вимоги до автономної навігації з врахуванням факторів, які визначають вплив на ухилення від зіткнення. Обговорюється, що дослідження щодо автоматизації управління судном можуть бути представлені в комп'ютерній або класичній категоріях. Класична техніка відповідно заснована на алгоритмах та математичних моделях, в той час, як комп'ютерні технології базуються на штучному інтелекті. До методів штучного інтелекту належать експертні методи, нейромережа, еволюційні алгоритми, логіка фузі, та комбінація цих методів - гібридні системи.

Робота носить чисто теоретичний характер і містить аналіз лише частини можливих методів в класичній та комп'ютерній категоріях. Більш того, в роботі відсутній порівняльний аналіз ефективності розглянутих методів і пропозицій по їх можливому використанні.

Метод для оцінки ризику зіткнення суден пропонується в роботі [143], який був одержаний на основі останніх досліджень проблем безпеки морського судноплавства. Цей метод може бути створений з урахуванням переваги штучної нейронної мережі в системі фузі. Переваги нового методу в порівнянні з традиційними методами підтвердили отримані в роботі результати.

Різні способи запобігання зіткнень суден розглянуто у роботі [144], до яких відносяться радіолокаційні, оглядові та УКХ-радіохвильові, а також більш сучасні, такі як теорії нечітких множин, генетичний алгоритм і домен судна. Показано, що ці методи призначені в ситуаціях бінарних взаємодій, але їх складніше застосувати в ситуаціях небезпечного зближення групи суден. Тому в роботі для попередження зіткнень суден запропоновано розподілений локальний Алгоритм пошуку (DLSA), в якому кілька суден спілкуються між

собою в певної області методом УКХ- радіохвиль. Алгоритм пошуку обчислює ризик зіткнення ґрунтуючись на інформації, яку отримав від сусідніх суден. Однак, алгоритму DLSA притаманний синдром QLM, що забороняє зміну курсу судну навіть в ситуації ризику зіткнення. Тому в даному дослідженні розроблено Децентралізований Табу Алгоритм пошуку (DTSA). Для порівняння ефективності алгоритмів DLSA та DTSA були проведені експерименти і виявилось, що DTSA перевершив DLSA.

Розглянуті в статті методи розходження групи суден не відповідають існуючим вимогам безпечного судноводіння і протирічать сучасним МППЗС в частині маневрування суден.

Питанням вдосконалення технології зовнішнього управління рухом суден в районах контролю СУРС присвячені роботи [145-150]. Як зазначається в роботі [145], із ростом морських перевезень проблема зіткнення суден або виникнення ситуацій небезпечного зближення суден на морських шляхах стає все більш важливою та потребує більшої уваги. Використовуючи принципи повного зовнішнього управління процесом розходження суден, були з допомогою експертних знань засновані підходи формування безпечних траєкторій руху суден, які постачаються судноводіям та службам організації та контролю руху. На відміну від цього, у статті пропонується використанням спеціалізованих алгоритмів їх узгодження шляхом попередніх домовленостей до рішення як процедура планування траєкторій руху суден. Рішення яке буде прийнятним для всіх суден, підпорядковуватиметься правилам запобігання зіткнень та включає у себе їхні динамічні моделі та проведення переговорів з метою оптимізації траєкторій без участі зовнішнього управління.

Як правило, СУРС для забезпечення безпеки судноплавства не має технічних можливостей контролювати рух суден в місцях скупчення суден, про що говориться в роботі [146], тому новий фузі-метод запропонований у статті, як додаток до засобів можливості уникнення від зіткнення системи СУРС-AIS. В Морську географічну інформаційну систему Marine Geographic Information System (MGIS) вводяться спільні данні СУРС з даними AIS, що дає

підставу для визначення області знаходження судна та розрахунку інерційних сил, що діють на судно. Одержана інформація також використовується для визначення моделі небезпечного індексу і захисного кола. Точне прогнозування часу і позиції зіткнення суден може бути отримано з застосуванням аналітичної моделі морської системи GIS.

Питання вибору маневру розходження для декількох суден зміною курсів або швидкостей розглянуті в роботах [147-150]. Причому в роботі [147] для вибору безпечного маневру розходження розглянуто використання небезпечної області курсів двох суден, а процедура вибору маневру розходження для трьох суден зміною їх курсів при зовнішньому управлінні приводиться в роботах [148, 149]. Попередженню зіткнень суден методами зовнішнього управління процесом розходження з використанням небезпечної області швидкостей суден присвячена робота [150].

Управління групою суден в ситуації небезпечного зближення присвячена робота [151]. В ній запропоновані різні принципи вибору сумісної стратегії розходження і проведено їх аналіз.

В роботі [152] запропонована процедура розрахунку системою управління рухом суден, що небезпечно зближуються, зміни курсу одного або обох суден. Одержані вирази похідних дистанції найкоротшого зближення по курсу одного з суден, а також по курсах обох суден, які характеризують швидкість зміни дистанції найкоротшого зближення при зміні курсів суден. Отримані інтегральні рівняння, рішення яких дозволяє знайти необхідні для безпечного розходження прирости курсів одного або обох суден.

Вибір оптимальної стратегії управління суднами зміною курсів для безпечного розходження в умовах можливого зіткнення запропоновано в роботі [153].

Умова існування множини маневрів розходження пари суден зміною їх швидкостей одержана в статті [154] і приведені аналітичні вирази одержаної умови з урахуванням вибраного режиму гальмування суден.

В роботі [155] розглянута ситуація небезпечного зближення суден в сти-

слих водах, в якій є неможлива зміна курсу для безпечного розходження. При зовнішньому управлінні попередження можливого зіткнення суден досягається за допомогою маневру зміни швидкостей обох суден з використанням областей небезпечних швидкостей. Сформульована умова існування маневру розходження зміною швидкості з урахуванням інерційних характеристик суден. Одержані необхідні аналітичні вирази для формування областей небезпечних швидкостей.

В роботі [156] запропоновано спосіб вибору безпечних курсів ухилення суден при зовнішньому управлінні за допомогою областей неприпустимих значень курсів суден. Показано, що при повороті інерційність судна веде до зменшення дистанції найкоротшого зближення. Одержана аналітична залежність для розрахунку уточненого значення гранично-допустимої дистанції з врахуванням інерційності судна, а також процедура для вибору маневру зміни курсу одного судна при незмінних параметрах руху іншого.

Стаття [157] присвячена процедурі комп'ютерного графічного визначення оптимального маневру розходження двох суден, що небезпечно зближуються, шляхом зміни їх швидкостей при збереженні незмінними курсів. В якості чисельного прикладу приведено конкретний варіант небезпечної ситуації зближення і реалізація запропонованої процедури.

Поняття ситуативного збурення введено в роботі [158] та приведені його характеристики, які визначають значення збурення в різних ситуаціях. Одержано аналітичні залежності, які визначають області постійних значень ситуативного збурення і запропоновано графічний спосіб оцінки його значення залежно від курсу судна з більшою швидкістю, гранично-допустимої дистанції та дистанції між суднами. Для значень ситуативного збурення рівного 1 і 2 приведено приклад початкових ситуацій при зближенні суден.

Система бінарної координації, що регулює взаємодію пари суден в ситуації небезпечного зближення при стандартному маневрі зміною курсу судна розглянута в роботі [159]. Вказано на потребу врахування вимоги закону необхідної різноманітності Ешбі при формуванні системи бінарної координації.

Одержано аналітичні умови, що задовольняють вимогам закону необхідної різноманітності. Вони полягають в компенсації ситуативного збурення обома суднами або судном яке має більшу швидкість.

Два типи управління процесом розходження парою суден в умовах небезпечного зближення розглянуто в роботі [160]. Перший із них є загальноприйнятим в судноводінні локально-незалежним управлінням, коли необхідна координація маневрів взаємодіючих суден, чим обумовлений розгляд принципу бінарної координації взаємодії пари суден у разі їх незалежного управління. В статті описані методи вибору оптимальної стратегії розходження при такому типі управління. Приводиться другий підхід до управління пари суден в ситуації небезпечного зближення з використанням принципу повного управління зовнішнім управлінцем системою двох суден. Для цього типу управління розглядається можливість визначення безпечного маневру розходження з допомогою області небезпечних курсів. Також розглянута можливість безпечного розходження суден використанням області небезпечних швидкостей при заданих початкових курсах.

Ситуація небезпечного зближення двох суден, яка характеризується ситуативним збуренням, значення якого залежить від співвідношення дистанції найкоротшого зближення і гранично-допустимої дистанції аналізується у роботі [161]. Причому ситуативне збурення може приймати значення рівне одиниці, при якому розходження виконується стандартним маневром, і значення рівне двом, при якому необхідно використовувати маневр екстреного розходження. Сформована вимога закону необхідної різноманітності Ешбі до системи бінарної координації. Він який передбачає відповідність різноманітності наявних курсів ухилення до різноманітності можливих небезпечних курсів зближення. Встановлено, що ця вимога виконується при компенсації ситуативного збурення маневром обох суден одночасно або маневром судна, що має більшу швидкість. Якщо зближаються два судна з однаковими статусами і швидкостями їх взаємні обов'язки визначаються тим, чи є їх курси зближення зустрічними або попутними.

В роботі [162] досліджується алгоритм на основі АСО для планування траєкторії судна та розглянуто новий підхід до рішення проблеми планування шляху для судна, що знаходиться в навколишньому середовищі із статичними і динамічними перешкодами, який базується на колективній поведінці колоній мурашок. Проблема пошуку оптимальної траєкторії для судна розглядається як багатокритерійна задача оптимізації. Критеріями, взятими до уваги при рішенні проблем є безпека шляху, довжина шляху, відповідність Міжнародним правилам запобігання зіткнення суден на морі (COLREG) і плавність ходу.

Пропонований підхід для рішення задачі розходження суден не являється коректним, так як не відповідає існуючим вимогам до формування маневру розходження і добрій морській практиці.

Стаття [163] присвячена використанню теорії матричних ігор для синтезу системи безпечного контролю судна в ситуації небезпечного зближення. В ній проведено аналіз чутливості алгоритму судового контролю відносно неточності інформації про стан процесу та зміни його параметрів. Параметри чутливості порівнювались на прикладі ситуації плавання в протоці Каттегат для гарної та обмеженої видимості.

Роботи [164-219], виконані автором одноосібно або в співавторстві, присвячені методу повного зовнішнього управління процесом розходження суден з використанням областей неприпустимих значень параметрів їх руху.

1.2. Вибір основного напрямку дисертаційного дослідження

Як раніше наголошувалось, зараз домінуючим принципом управління процесом розходження є локально-незалежне управління, що потребує використання принципу узгодження взаємодії суден при їх небезпечному зближенні, в якості якого задіяна бінарна координація, реалізована в МПЗЗС-72 стосовно маневрування суден для попередження їх зіткнення.

Однак існуючим МПЗЗС-72 притаманні суттєві недоліки, розглянуті в роботах [109, 220-226]. В роботі [221] зазначається, що однією із суттєвих причин зіткнення суден являється невизначеність в ряді ситуацій зближення, а в роботі [222] відмічається, що невизначеність при оцінці однієї і тієї ж ситуації судноводіями суден, що зближаються, ставить в складне положення судноводія, котрий повинен, згідно Правилу 17 МПЗЗС-72, зберігати незмінними параметри руху свого судна.

В роботі [223] пропонується вернутися до використання правила «лівого борту», яке передбачає в ситуації небезпечного зближення на курсах, що перетинаються, маневрування обох суден зміною курсу вправо, а в роботі [224] приводиться логічне протиріччя МПЗЗС-72, що за думкою автора, пояснюється суб'єктивним досвідом судноводіння авторів Правил і спрощеним геометричним підходом для рішення задач розходження.

Неможливість автоматизації процесу розходження суден із врахуванням вимог МПЗЗС-72 обґрунтовано в роботі [225] аналізом співставлення дій судноводія при розходженні з нормативними положеннями МПЗЗС-72.

В роботі [226] була проведена розробка імітаційної моделі процесу розходження двох суден, причому моделювання процесу розходження показало ряд невизначеностей, з якими стикається судноводій в процесі реального розходження і які знижують безпеку маневру розходження. Причиною таких невизначеностей являються МПЗЗС-72, виконання вимог яких нині являється обов'язковим.

Невизначеність в коректній взаємодії суден виникає ще на етапі оцінки небезпеки ситуації зближення, тобто при виявленні ситуаційного збурення. Мірою небезпечного зближення суден є гранично - допустима дистанція найкоротшого зближення, величина якої в різних умовах плавання може коливатися в деяких межах і по-різному оцінюватися судноводіями суден, що зближуються.

Таким чином, основним недоліком локально-незалежного управління процесом розходження є проблема забезпечення коректної взаємодії суден

шляхом узгодження їх маневрів в ситуації небезпечного зближення.

З іншої сторони в стислих районах плавання з інтенсивним суднопотоком часто процес судноводіння контролюється СУРС, які також здійснюють управління суднами, що небезпечно зближуються, що потребує розробки методів вибору оптимальної стратегії розходження суден із врахуванням сучасних можливостей комп'ютерних інформаційно-управляючих технологій.

Вирішення перелічених проблем досягається застосуванням принципу повного зовнішнього управління процесом розходження, розробка якого започаткована в роботах автора дисертаційного дослідження. Тому подальший розвиток принципу повного зовнішнього управління процесом розходження суден та розробка оперативних методів його реалізації є перспективною і актуальною тематикою, чим і обумовлюється вибір напрямку досліджень даної дисертаційної роботи.

1.3. Висновки за першим розділом

У першому розділі в результаті огляду літературних джерел здійснено аналіз основних напрямів вирішення проблеми зниження аварійності суден.

Встановлені основні напрямки рішення проблеми забезпечення безпеки судноводіння, до яких відноситься розробка методів попередження зіткнень суден у прибережних районах плавання, розробка моделей руху судна при його плаванні в стислих районах, що сприяє їх більш ефективному і безпечному плаванню, та забезпечення належного рівня точності контролю місця судна і оцінка безпеки судноводіння в стислих умовах.

За результатами аналізу було встановлено, що основним напрямом рішення даної проблеми є вдосконалення методів попередження зіткнень суден в ситуаціях небезпечних зближень.

В розділі було обґрунтовано основний напрям дисертаційного дослідження присвяченого подальшому розвитку принципу повного зовнішнього

управління процесом розходження суден та розробка оперативних методів його реалізації.

Об'єктом дослідження є процес попередження зіткнення суден, а предметом дослідження є методи повного зовнішнього управління процесом розходження суден.

РОЗДІЛ 2.

МЕТОДОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДИСЕРТАЦІЙНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ

2.1. Визначення теми наукового дослідження

В результаті аналізу, який було проведено в попередньому розділі, встановлено, що одним з найбільш актуальних аспектів забезпечення безаварійності судноводіння є попередження зіткнень суден при плаванні в стислих водах, тому дисертаційне дослідження, як показано в підрозділі 1.2, присвячене розвитку принципу повного зовнішнього управління процесом розходження суден із розробкою оперативних методів його реалізації.

Для вирішення вказаної задачі потрібно, перш за все, сформулювати теоретичний базис дослідження, що передбачає розробку аналітичних систем попередження зіткнення суден, орієнтованих на реалізацію за допомогою сучасних комп'ютерних інформаційних технологій при використанні розширеного принципу зовнішнього управління процесом розходження, що забезпечить оперативність, простоту і надійність вибору стратегії розходження.

Наступним етапом дослідження полягає в розробці методів визначення стратегії розходження за допомогою областей неприпустимих значень параметрів руху суден, які враховують форму безпечного домену судна.

Таким чином, проблема попередження зіткнень суден розробкою теорії і сучасних методів вдосконалення процесу розходження, що мають комп'ютерну реалізацію, є актуальною і перспективною, і це обумовлює вибір теми дисертації, яка сформульована наступним чином: «Розвиток теорії і методів зовнішнього управління суднами в ситуації небезпечного зближення».

Вирішення задачі по вказаній проблематиці вимагає розгляду наступних основних питань:

- провести декомпозицію головної задачі дисертаційного дослідження на

декілька складових незалежних задач, використовуючи методи системного підходу;

- розробити стандартну та нестандартні аналітичні системи попередження зіткнення суден, які забезпечують можливість визначення маневру розходження в залежності від форми безпечного домену судна;

- дослідити розширений принцип зовнішнього управління процесом розходження суден, застосування якого передбачено не тільки в СУРС, але і на суднах при наявності відповідного обладнання, чим може бути значно підвищена ефективність та безпека стратегії розходження;

- розробити групу аналітичних методів попередження зіткнення суден для формування областей неприпустимих значень параметрів їх руху, за допомогою графічного відображення яких визначаються стратегії розходження, що забезпечує оперативність і коректність прийняття рішення по запобіганню небезпечних зближень суден;

- розробити комп'ютерну імітаційну програму вибору безпечного маневру розходження аналітичними методами попередження зіткнення суден та програвання вибраного маневру для перевірки коректності запропонованих в дисертації методів розходження суден.

Актуальність тематики дисертаційного дослідження визначає необхідність вдосконалення методів розходження суден в стислих районах плавання і, як результат, підвищення рівня безпеки судноводіння.

Вирішення перерахованих основних питань містить наукову новизну дослідження.

Економічну ефективність дисертаційного дослідження складає можливе скорочення збитків від зниження рівня аварійності внаслідок запобігання навігаційним аваріям.

Розробка теоретичної частини дисертації і її перевірка за допомогою імітаційного моделювання дають можливість реалізації запропонованого наукового дослідження.

Об'єктом дослідження є процес попередження зіткнення суден.

Предметом дослідження є методи повного зовнішнього управління процесом розходження суден.

2.2. Характеристика методів дослідження дисертаційної роботи

Методи рішення поставленої в дисертації проблеми вибиралися, виходячи з таких міркувань. Перш за все, сучасні наукові дослідження важливих проблем, до яких можна віднести і проблему, що розглядається в дисертації, повинні вестися з позицій системного підходу, який є міждисциплінарним науковим напрямом, що вивчає об'єкти будь-якої фізичної природи як системи.

Згідно сучасної класифікації всі існуючі проблеми підрозділяються на три класи:

- добре структуровані, або кількісно сформульовані проблеми (істотні залежності з'ясовані дуже добре);
- неструктуровані, або якісно виражені проблеми, що містять лише опис найважливіших характеристик, ознак і ресурсів (кількісні залежності між якими абсолютно невідомі);
- слабо структуровані, або змішані проблеми, які містять якісні елементи, маловідомі та невизначені сторони, які мають тенденцію домінувати.

Для вирішення добре структурованих кількісно виражених проблем використовується відома методологія дослідження операцій, яка полягає в побудові адекватної математичної моделі і застосуванні методів для визначення оптимальної стратегії управління цілеспрямованими діями. Математична модель може бути розроблена за допомогою методів, наприклад, лінійного, нелінійного, динамічного програмування, теорії масового обслуговування, теорії ігор і ін.

Для вирішення слабо структурованих проблем використовуються методологія системного аналізу, системи підтримки прийняття рішень (СППР).

Проблема, що розглядається в даному дисертаційному дослідженні, як показує аналіз, приведений в першому розділі, є добре структурованою кількісно формалізованою проблемою, рішення якої вимагає використання методології дослідження операцій.

Рішення поставленої в дисертаційному дослідженні проблеми вимагає застосування наступних методів:

- дослідження операцій для декомпозиції головної задачі дисертації на незалежні складові задачі;
- теорії динамічних багатокерованих систем, яка дозволяє описати процес розходження суден з урахуванням декількох незалежних учасників, що управляють процесом, як динамічну систему;
- математичного програмування для коректної постановки задачі вибору оптимального маневру по відповідному критерію;
- математичних моделях руху судна;
- математичного аналізу для розв'язання рівнянь руху судна і пошуку залежності параметрів руху судна від керуючих управлінь;
- аналітичної геометрії для формування області неприпустимих значень параметрів руху суден елементарної групи.

На рис. 2.1. показана технологічна карта методологічного забезпечення дослідження по темі дисертації, яке забезпечує рішення головної задачі дисертаційної роботи методами системного підходу. Технологічна карта містить комплексне завдання роботи, три головних завдання і вісім допоміжних завдань. Приведено рішення і наукове положення кожного із головних завдань, як і комплексного завдання роботи.

Приведемо загальну характеристику методологічного забезпечення дослідження по темі дисертації, аналізуючи його технологічну карту.

Сучасними запитами практики є необхідність підвищення рівня безпеки судноводіння і розробки сучасних методів оптимізації процесу розходження суден в стислих районах плавання.

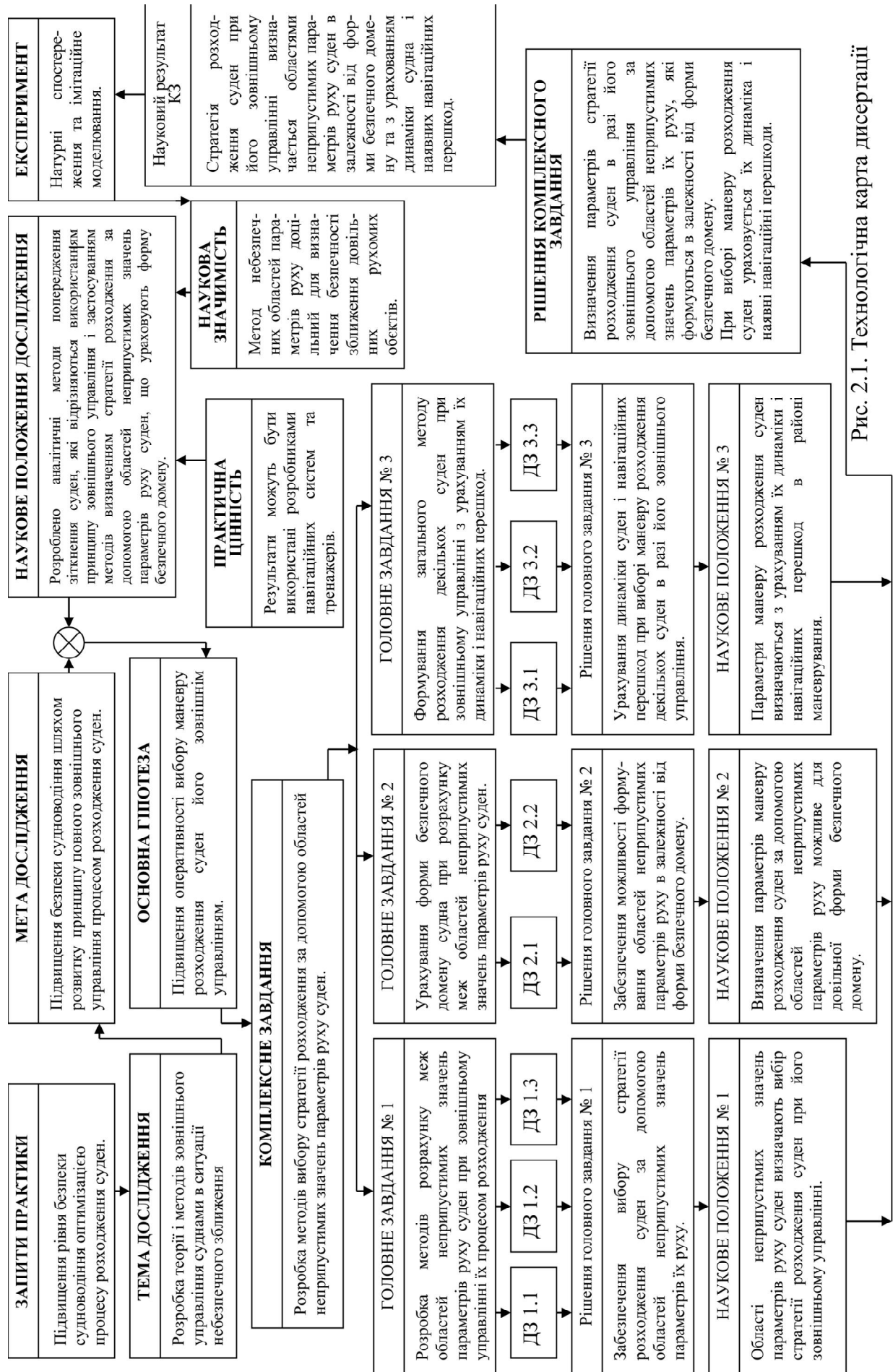


Рис. 2.1. Технологічна карта дисертації

Допоміжні завдання

№	ДЗ	Зміст
1	ДЗ 1.1	Дослідження розширеного принципу зовнішнього управління процесом розходження суден, який може бути застосованим як в СУРС, так і на судах при наявності відповідного обладнання, що може значно підвищити ефективність та безпеку процесу розходження.
2	ДЗ 1.2	Формування групи методів аналітичної системи попередження зіткнення суден для розрахунку меж областей неприпустимих значень параметрів їх руху, за допомогою графічного відображення яких визначаються стратегії розходження, що забезпечує оперативність і коректність прийняття рішення по запобіганню небезпечних зближень суден.
3	ДЗ 1.3	Формування областей неприпустимих курсів, неприпустимих швидкостей і неприпустимих курсів та швидкостей.
4	ДЗ 2.1	Розробка стандартної аналітичної системи попередження зіткнення суден, яка призначена для визначення маневру розходження з використанням безпечного домену судна круглої форми.
5	ДЗ 2.2	Розробка нестандартних аналітичних систем попередження зіткнення суден, що забезпечують можливість розрахунку параметрів маневру розходження в разі еліптичної та прямокутної форм безпечного домену судна.
6	ДЗ 3.1	Розробка методу перетворення матриці ситуаційного збурення в нульову матрицю, який заснований на визначенні оптимального вектору зовнішнього управління групою суден, що небезпечно зближаються, чим досягається безпечне розходження зміною курсів мінімальної кількості суден групи.
7	ДЗ 3.2	Розробка способу урахування третього судна при визначенні параметрів маневру розходження суден елементарної групи за рахунок використання принципу зовнішнього управління процесом розходження суден із допомогою областей неприпустимих значень параметрів їх руху.
8	ДЗ 3.3	Формування загального методу урахування навігаційних перешкод і динаміки суден при визначенні меж областей неприпустимих значень їх параметрів руху, який передбачає використання різних моделей обертального руху суден та їх гальмування, що забезпечує коректність використання одержаних результатів в стислих районах плавання.

Метою дисертаційного дослідження являється підвищення безпеки судноводіння шляхом розвитку принципу повного зовнішнього управління процесом розходження суден із розробкою оперативних методів його реалізації.

Науковою гіпотезою дисертаційного дослідження прийнято допущення про існування можливості підвищення оперативності і простоти вибору маневру розходження суден зовнішнім управлінням процесом розходження із використанням методів вибору оптимального маневру розходження.

Головна задача дослідження полягає в розробці алгоритмів і програми одержаних методів визначенням оптимальної стратегії розходження за допомогою областей неприпустимих значень параметрів руху суден, які враховують форму безпечного домену судна.

Для вирішення головної задачі дисертації була виконана її декомпозиція на незалежні складові задачі, для цього були використані методи теорії дослідження операцій. Виявилось доцільним розділити головну задачу дисертаційного дослідження на наступні незалежні складові задачі:

1. Розробка аналітичних методів попередження зіткнення суден, яка призначена для визначення маневру розходження з використанням безпечного домену судна круглої форми.

2. Розробка нестандартних аналітичних методів попередження зіткнення суден, що забезпечують можливість розрахунку параметрів маневру розходження в разі еліптичної та прямокутної форм безпечного домену судна.

3. Дослідження розширеного принципу зовнішнього управління процесом розходження суден, що може бути застосованим як в СУРС, так і на судах при наявності відповідного обладнання, що може значно підвищити ефективність та безпеку процесу розходження.

4. Формування групи аналітичних методів попередження зіткнення суден для розрахунку меж областей неприпустимих значень параметрів їх руху, за допомогою графічного відображення яких визначаються стратегії розходження, що забезпечує оперативність і коректність прийняття рішення по запобі-

ганню небезпечних зближень суден.

5. Розробка методу перетворення матриці ситуаційного збурення в нульову матрицю, який заснований на визначенні оптимального вектору зовнішнього управління групою суден, що небезпечно зближаються, чим досягається безпечне розходження зміною курсів мінімальної кількості суден групи.

6. Формування підходу врахування навігаційних перешкод і динаміки суден при визначенні меж областей неприпустимих значень їх параметрів руху, який передбачає використання різних моделей обертального руху суден та їх гальмування, що забезпечує коректність використання одержаних результатів в стислих районах плавання.

7. Розробка способу врахування третього судна при визначенні параметрів маневру розходження суден елементарної групи за рахунок використання принципу зовнішнього управління процесом розходження суден із допомогою областей неприпустимих значень параметрів їх руху.

Вирішення задач дисертаційного дослідження потребувало розробки комп'ютерної програми, що містить окремі модулі розрахунку меж кожної із областей неприпустимих значень параметрів для стандартної і нестандартної аналітичних систем попередження зіткнення суден та відображення областей на екрані монітору з метою вибору оптимальних параметрів маневру розходження суден з подальшим його програванням.

Така імітаційна програма може стати основою для розробки навігаційної інформаційної системи, що забезпечує при зовнішньому управлінні вибір оптимального маневру розходження суден.

При рішенні складових незалежних задач були одержані наступні відповідні наукові результати:

- вперше започатковано принцип зовнішнього управління процесом розходження суден, застосування якого передбачено в СУРС, чим може бути значно підвищена ефективність та безпека стратегії розходження;

- вперше запропоновано і розроблено методи аналітичного розрахунку стратегії попередження зіткнення суден при зовнішньому управлінні, які по-

діляються на стандартні та нестандартні, що забезпечує можливість визначення маневру розходження в залежності від форми безпечного домену судна;

- вперше розроблено групу методів для формування областей неприпустимих значень параметрів руху суден при зовнішньому управлінні їх процесом розходження, за допомогою графічного відображення яких визначаються стратегії розходження, що забезпечує оперативність і коректність прийняття рішення по запобіганню небезпечних зближень суден;

- вперше розроблено метод визначення оптимального вектору зовнішнього управління групою суден, що небезпечно зближаються, яким досягається безпечно розходження зміною курсів мінімальної кількості суден групи;

- вперше для зовнішнього управління процесом розходження суден сформовано загальний метод врахування їх динаміки і навігаційних перешкод при визначенні меж областей неприпустимих значень їх параметрів руху, який передбачає використання різних моделей обертального руху суден та їх гальмування, що забезпечує коректність використання одержаних результатів при розходженні суден в стислих районах плавання;

- одержали подальший розвиток методи врахування третього судна, що заважає, при визначенні параметрів маневру розходження суден елементарної групи за рахунок використання принципу зовнішнього управління процесом розходження суден за допомогою областей неприпустимих значень параметрів їх руху.

Прийнята наукова гіпотеза про існування можливості підвищення оперативності і простоти вибору маневру розходження суден зовнішнім управлінням процесом розходження із використанням методів вибору оптимального маневру розходження підтверджена одержаними в дисертаційній роботі теоретичними результатами та імітаційним моделюванням.

Проведеному дисертаційному дослідженню властива практична значу-

щість, яка полягає у тому, що його результати можуть бути впроваджені на судна в процесі експлуатації, а також використані розробниками навігаційних інформаційних систем, призначених для зовнішнього управління процесом розходження судна, та розробниками сучасних навігаційних тренажерів.

Практична цінність результатів дисертаційної роботи визначається тим, що отримані в роботі теоретичні результати і програми можуть застосовуватись при навчанні курсантів і підвищенні кваліфікації судноводіїв.

Наукові результати і проведене імітаційне моделювання, отримані в дисертаційному дослідженні, визначають його наукове положення, сформульоване наступним чином:

розроблено аналітичні методи попередження зіткнення суден, реалізація яких передбачена в комп'ютерній навігаційній системі підтримки рішень, та які відрізняються використанням принципу зовнішнього управління процесом розходження суден і застосуванням методів визначення його оптимальної стратегії з використанням областей неприпустимих значень параметрів руху суден, що враховують форму безпечного домену судна.

2.3. Методика проведення дослідження по темі дисертації

Змістом даного підрозділу являється короткий виклад методики проведення дисертаційного дослідження по темі роботи з вказівкою вживаних для цього методів.

Як впливає з рекомендацій по організації і проведенню наукових досліджень, перш за все, слід провести аналіз основних підходів рішення проблеми безпеки судноводіння, в результаті якого можливо здійснити вибір основного напрямку і теми дисертаційного дослідження.

Декомпозиція головної задачі дисертації на незалежні складові задачі є другим етапом роботи і виконується методами дослідження операцій, за допомогою яких також забезпечується методологічне обґрунтування дисерта-

ційного дослідження.

Розробка стандартних методів попередження зіткнення суден, які призначені для вибору маневру розходження за допомогою областей неприпустимих значень параметрів руху суден елементарної системи із використанням безпечного домену судна круглої форми являє собою третій етап дисертаційного дослідження. До четвертого етапу дисертаційної роботи відноситься розробка аналітичних методів попередження зіткнення суден, які забезпечують можливість розрахунку параметрів маневру розходження в разі еліптичної та прямокутної форм безпечного домену судна. На цьому етапі слід дослідити доцільність використання безпечного домену судна складної форми, в якій враховуються кругова та еліптична форми.

П'ятий етап роботи полягає в дослідженні розширеного принципу зовнішнього управління процесом розходження суден та можливості його застосування в СУРС і на судах при використанні відповідної навігаційно-інформаційної системи.

Формування групи різних аналітичних методів попередження зіткнення суден, призначених для розрахунку меж областей неприпустимих значень параметрів руху суден елементарної групи, за допомогою графічного відображення яких визначаються стратегії розходження та розробка необхідних для цього процедур є шостим етапом дисертаційного дослідження.

Наступним сьомим етапом роботи являється розробка методу перетворення матриці ситуаційного збурення в нульову матрицю, в основу якого покладено процедуру, засновану на визначенні оптимального вектору зовнішнього управління групою суден, що небезпечно зближаються, причому формується безпечне розходження зміною курсів мінімальної кількості суден групи.

Черговий восьмий етап дисертаційного дослідження полягає в формуванні загального методу урахування навігаційних перешкод і динаміки суден елементарної групи при визначенні меж областей неприпустимих значень їх параметрів руху, причому методом передбачено використання різних моделей

обертального руху суден та моделей зниження їх швидкостей активним та пасивним гальмуванням з урахуванням характеристик стислих районів плавання та наявних навігаційних перешкод в області можливого маневрування.

Завершальним етапом дисертаційної роботи являється розробка способу врахування третього судна при визначенні параметрів маневру розходження суден елементарної групи використанням принципу зовнішнього управління процесом розходження суден із допомогою областей неприпустимих значень параметрів їх руху.

На закінчення роботи необхідно формувати модуль програвання одержаного маневру розходження, як засіб перевірки коректності процедури вибору маневру розходження в ситуації небезпечного зближення.

Сукупність перерахованих етапів проведення дисертаційного дослідження по визначеній темі забезпечення безаварійного судноводіння в стислих районах плавання суден являється змістом методики проведення дослідження по темі дисертації.

2.4. Висновки за другим розділом

Другий розділ дисертаційної роботи присвячений вибору теми дослідження і його основним напрямам. В розділі приведено характеристику методологічної структури дисертації і приведено її методологічне забезпечення.

У технологічному забезпеченні методологічного обґрунтування роботи вказана мета дисертаційного дослідження і представлена його головна задача, причому здійснена її декомпозиція на незалежні складові задачі. Сформульована і підтверджена робоча гіпотеза наукового дослідження, показано, що при вирішенні незалежних складових задач одержані відповідні наукові результати дисертаційної роботи.

У другому розділі також показані значущість і практична цінність дисертаційного дослідження, а також сформульоване основне наукове положення роботи. Приведена коротка методика рішення складових задач, поставлених в

роботі, причому вона описує основні етапи виконання наукового дослідження по темі дисертації та включає теоретичні розробки і проведення імітаційного комп'ютерного моделювання.

РОЗДІЛ 3.

МАТЕМАТИЧНИЙ ОПИС ЕЛЕМЕНТАРНОЇ ГРУПИ СУДЕН, ЩО НЕБЕЗПЕЧНО ЗБЛИЖУЮТЬСЯ

3.1. Аналітичний опис принципів попередження зіткнення суден елементарної групи

Введемо поняття елементарної групи суден, яка представляє собою два судна, а її стан характеризується параметрами істинного руху V_1, K_1, V_2, K_2 і параметрами відносної позиції D, α . Причому вважаємо, що $V_2 \geq V_1$, тобто судно c_2 домінує по швидкості над судном c_1 .

Якщо розглядати переміщення судна c_1 відносно судна c_2 , то відносний рух характеризується курсом K_{ot} і швидкістю V_{ot} , які показані на рис. 3.1.

Розглянемо таку категорію, як ситуація s , яка характеризується станом елементарної групи суден і можливістю управління їх відносною позицією. Відзначимо, що можлива декомпозиція множини ситуацій S на підмножини неприпустимих ситуацій S_d , попадання в яке з високою ймовірністю веде до зіткнення, і підмножина безпечних ситуацій S_s , при перебуванні в яких і незмінних параметрах руху суден небезпечне зближення не виникає. Однак крім цих двох полярних підмножин існують підмножини, перебування судна в яких при незмінних параметрах руху в подальшому веде до небезпечного зближення з партнером по ситуації. Підмножину таких ситуацій позначимо S_ω .

Оскільки кожне судно контролює своє положення, як і положення навколишніх рухомих об'єктів, за допомогою суднової системи навігаційної інформації, то елементарній групі суден притаманний стохастичний аспект, який обумовлений, як елементами невизначеності поведінки суден, так і наявністю похибок вимірювання навігаційних параметрів.

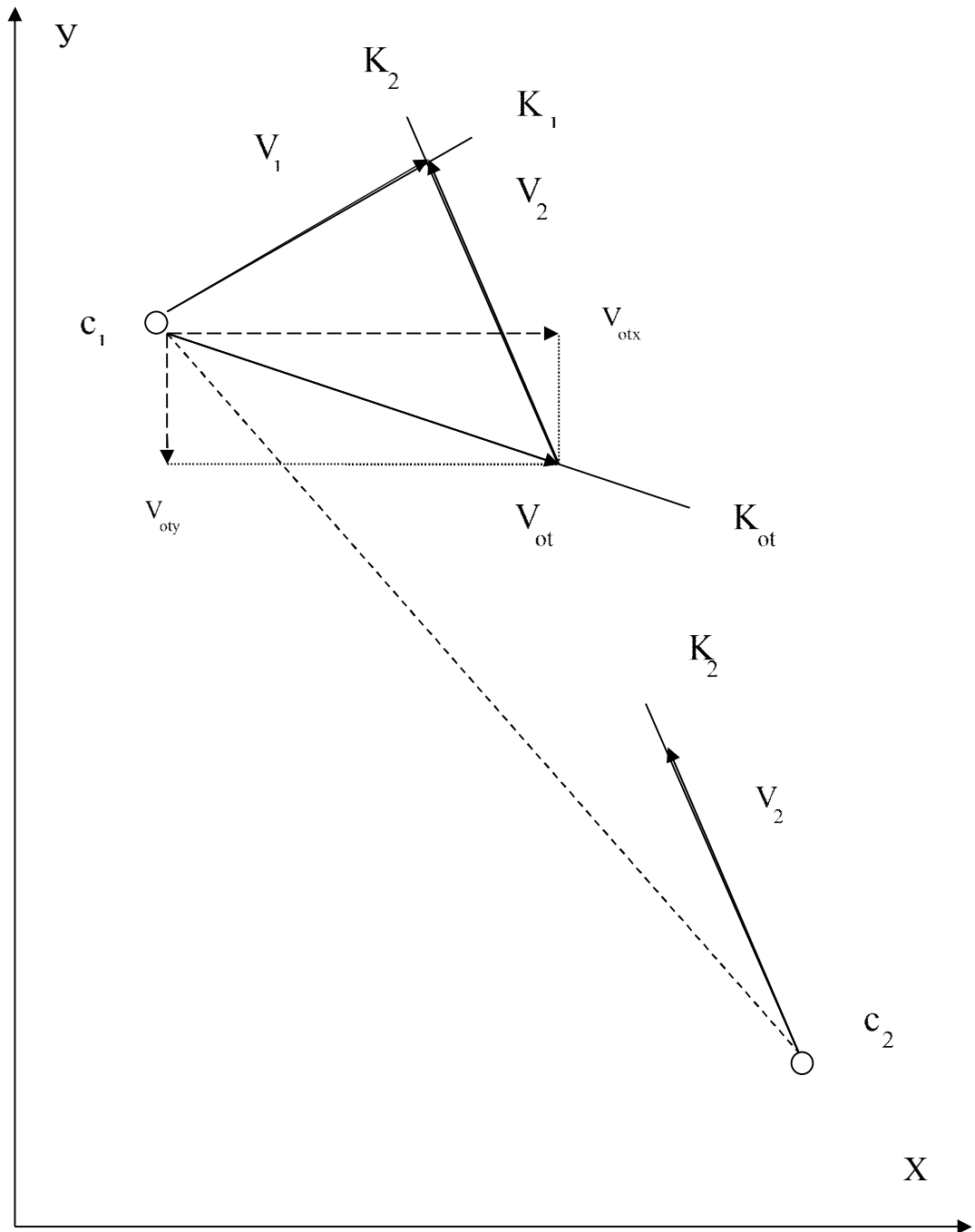


Рис. 3.1. Параметри істинного і відносного руху групи суден

На множині $M_p = \{D, \alpha\}$ можливих позицій суден елементарної групи розподілена імовірнісна міра безпеки зіткнення P_b . Тому множина M_p є об'єднанням підмножин M_{pk} , кожне з яких характеризується певним ступенем небезпеки виникнення аварії зіткнення (від нульової ймовірності зіткнення до

одиничної).

Виходячи з наявності стохастичного аспекту і аспекту невизначеності, а також в силу інерційності рухомих суден, з кожним з них пов'язується двомірна область S_{nd} , звана областю неприпустимих позицій, в якій небажано перебування будь-яких сторонніх об'єктів. При розгляді відносного переміщення суден таким об'єктом є тільки інше судно.

Область неприпустимих позицій S_{nd} повинна бути сформована таким чином, щоб на її межі була нульова ймовірність зіткнення. А будь-якій точці всередині даної області відповідала деяка відмінна від нуля ймовірність ситуації зіткнення, причому ймовірність зіткнення зростає зі скороченням найкоротшої дистанції між суднами.

Ситуаційне збурення ω виникає при прогнозованому попаданні суден в область неприпустимих позицій. Ситуаційне збурення виявляє майбутню небезпечну позицію завчасно, виходячи з прогнозу зміни відносної позиції двох суден і носить умовний характер, так як на його істинність впливають можливі способи прогнозу і дії суден. Отже, ситуаційне збурення ω виникає в випадку, коли прогнозоване значення дистанції найкоротшого зближення D_{min} менше значення гранично допустимої дистанції зближення D_d . Її величина залежить від ракурсу зближення суден і форми області неприпустимих позицій.

Другою характеристикою ситуаційного збурення є час запасу t_{zi} та t_{zj} для кожного з пари суден елементарної групи. Розуміння часу запасу полягає в наступному. Якщо при наявності ситуаційного збурення дистанція між суднами перевищує значення D_d і судно може своїм маневром забезпечити максимальне значення заданої дистанції найкоротшого зближення $\max D_{min}$, $\max D_{min} > D_d$, тоді судно знаходиться в допустимій позиції. З плином часу дистанція між суднами зменшується і настає момент часу t_{di} , коли досягається рівність $\max D_{min} = D_d$. При подальшому зближенні суден з програмними

параметрами руху $\max D_{\min} < D_d$, і судно потрапляє до підмножини неприпустимих позицій, причому ніяким маневром зміни курсу воно не зможе розійтися з другим судном в дистанції D_d . Як результат, час запасу t_{zi} буде дорівнювати інтервалу часу від поточного моменту до моменту часу t_{di} попадання судна до підмножини неприпустимих позицій. Значення ж загального часу запасу t_{zij} для пари суден доцільно вибрати зі співвідношення $t_{zij} = \min(t_{zi}, t_{zj})$.

Ситуаційне збурення ω характеризується інтенсивністю, величина якої пропорційна ймовірності зіткнення суден. За допомогою деякого правила інтенсивність ситуаційного збурення можна аранжувати цілочисельними значеннями від 0 (відсутність ситуаційного збурення) до деякого максимального значення n_s . У цьому дослідженні ситуаційне збурення може приймати три значення:

$$\omega = \begin{cases} 0, & D_{\min} > D_d, \\ 1, & D_{\min} \leq D_d, t_{zij} > 0, \\ 2, & D_{\min} \leq D_d, t_{zij} \leq 0. \end{cases}$$

Принципово важливим аспектом управління елементарної групою суден є повнота керування, яка може бути реалізована наступними двома підходами.

Одним з них є локально-незалежне керування, суть якого полягає в контролі окремим судном поточного стану елементарної групи суден, в якій воно знаходиться, а при наявності ситуаційного збурення його компенсація проводиться, як правило, одним з взаємодіючих суден. Такий тип управління є досить короткозорим і може ефективно використовуватися тільки при низькій інтенсивності руху суден.

Якісно іншим є повне (зовнішнє) керування зовнішнім управлінцем, який розпоряджається стратегіями суден елементарної групи, який спостерігає поточну ситуацію і, при наявності ситуаційного збурення, компенсує його

спільним маневром розходження. Таким управлінцем може бути, як СУРС, так і, що принципово важливо, суднова інформаційно-навігаційна система, з тими ж можливостями, яка встановлена на кожному із суден, що вирішує задачу колективної компенсації ситуаційного збурення і реалізує отриману в результаті рішення індивідуальну стратегію.

Саме висока ефективність повного керування при великій інтенсивності суднопотоку зумовила появу і стрімкий розвиток СУРС. Очевидно, розвиток принципів зовнішнього керування процесом розходження є одним з найбільш перспективних напрямків зниження аварійності в обмежених умовах плавання.

У загальному випадку елементарну групу суден доцільно формалізувати за допомогою наступної математичної моделі. Припустимо, в початковий момент часу відносна позиція суден елементарної групи характеризується параметрами α_0 та D_0 , а множина можливих поєднань параметрів їх руху, як складових вектору керування, можна описати чотиривимірним простором параметрів K_1, V_1, K_2, V_2 , яке будемо називати простором істинного руху. Аналогічно, простір відносного руху є двовірним простором відносних параметрів руху курсу K_{ot} і швидкості V_{ot} . Відносна позиція, тобто значення пеленга α і дистанції D , є інваріантною для обох просторів.

Надалі область неприпустимих позицій S_{nd} для зручності термінології будемо називати судовим доменом.

Традиційно гранично допустима дистанція зближення D_d не залежить від взаємного положення суден елементарної групи і приймається незмінною за величиною для реалізованої ситуації зближення, а це значить, що безпечний домен судна має форму кола і задається в просторі відносного руху.

Однак в даний час запропоновано більше десяти форм безпечного домену [123], відмінних від кола. Тому гранично допустима дистанція зближення D_d при використанні таких доменів не є постійною, а залежить від ракурсу суден, що зближаються. В роботі [132] розглянуті різні за формою домени,

задані в просторі відносного руху, і отримано перетворення їх форм у простір істинного руху.

Межа між підмножиною безпечних ситуацій S_s і підмножиною ситуацій S_ω , що ведуть до небезпечного зближення з $\omega = 1$ визначається рівністю дистанцій найкоротшого зближення і гранично допустимого зближення, тобто $D_{\min} = D_d$ за умови, що судна зближуються ($\dot{D} < 0$). Як показано в роботі [84], величини $D_{\min}$ та $\dot{D}$ визначаються початковою відносною позицією і параметрами відносного руху:

$$D_{\min} = |D \sin(K_{ot} - \alpha)|,$$

$$\dot{D} = -V_{ot} \cos(\alpha - K_{ot}).$$

Оскільки при зближенні суден $\dot{D} < 0$, то $0 \leq (\alpha - K_{ot}) < \pi/2$.

Як впливає з наведених виразів для $D_{\min}$ та $\dot{D}$, межа між підмножинами ситуацій S_s та S_ω визначається однією точкою (K_{otg}, V_{otg}) простору відносного руху, якій відповідає межа в просторі істинного руху, що залежить від параметрів руху суден, які відповідають співвідношенню:

$$D_d = F_{rt}(K_1, V_1, K_2, V_2), \quad (3.1)$$

де F_{rt} – відображення з простору відносного руху в простір істинного руху.

Якщо межу (3.1) чотиривимірного простору проектувати на одну з його площин, осями яких є параметри руху різних суден елементарної групи, тобто $K_1 \times K_2$, $V_1 \times V_2$ або $K_1 \times V_2$, то можна отримати межі двовірних областей неприпустимих параметрів руху суден групи.

Слід врахувати, що в рівнянні (3.1) значення D_d є незмінним тільки для

домену круглої форми, а для доменів іншої форми значення D_d залежить від пеленга, курсу судна-партнера K_p і параметрів форми домену θ_i , тобто $D_d(\alpha, K_p, \theta_i)$. Отже, в загальному випадку існує можливість розробки різних аналітичних систем попередження зіткнення суден $Sist$, кожна з яких характеризується наступними істотними аспектами:

- принципом управління процесом розходження суден Pr ;
- способом оцінки небезпеки зближення і вибору маневру розходження $SpDv$;
- формою домену неприпустимих позицій Φ .

Таким чином, аналітична система попередження зіткнення суден формально записується в такий спосіб $Sist\{Pr, SpDv, \Phi\}$. У цьому дослідженні розглянемо аналітичні системи, в яких реалізований принцип зовнішнього управління процесом розходження суден, а способом оцінки небезпеки зближення і вибору маневру розходження обраний спосіб формування двовірних областей неприпустимих параметрів руху елементарної групи суден. Вибір принципу зовнішнього керування процесом розходження суден обумовлений його високою ефективністю в обмежених районах плавання, обладнаних СУРС. Більш того, при цьому принципі керування немає необхідності використання бінарної координації взаємодії суден. Спосіб формування двовірних областей неприпустимих параметрів руху елементарної групи суден є оперативним і зручним для реалізації у вигляді комп'ютерного модуля.

В першу чергу розглянемо аналітичну систему попередження зіткнення суден для традиційного домену кругової форми, радіус якого дорівнює гранично допустимій дистанції зближення D_d .

Вирішення поставленої задачі вимагає в першу чергу досліджень взаємозв'язку просторів відносного і істинного руху і методів формування областей неприпустимих параметрів руху елементарної групи суден.

3.2. Взаємозв'язок параметрів істинного і відносного руху суден елементарної групи та його аналіз

Розглянемо залежність параметрів відносного руху від параметрів істинного руху. Позначимо проекції сумарної відносної швидкості V_{otx} та V_{oty} (рис. 3.1), причому:

$$V_{otx} = V_1 \sin K_1 - V_2 \sin K_2$$

та

$$V_{oty} = V_1 \cos K_1 - V_2 \cos K_2.$$

$$V_{ot} = \sqrt{V_{otx}^2 + V_{oty}^2},$$

або

$$V_{ot} = [V_1^2 + V_2^2 - 2V_1 V_2 \cos(K_1 - K_2)]^{1/2},$$

$$K_{ot} = \begin{cases} \psi, \text{ при } V_{otx} > 0, V_{oty} > 0, \\ \pi + \psi, \text{ при } V_{oty} < 0, \\ 2\pi + \psi, \text{ при } V_{otx} < 0, V_{oty} > 0 \end{cases}, \quad (3.2)$$

де $\psi = \arcsin[(V_1 \sin K_1 - V_2 \sin K_2)/V_{ot}]$.

Розглянемо закономірності зміни відносного курсу K_{ot} в разі зміни істинного курсу одного з суден при незмінному курсі іншого судна. При цьому зробимо це спочатку безвідносно до конкретного судна c_1 або c_2 . Для цього позначимо істинний курс судна, що виконує поворот, через K_o , а швидкість –

V_o . Відповідно для судна, що не змінює свій курс, параметри руху позначені K_c та V_c .

Знайдемо вираз першої похідної відносного курсу по справжньому курсу судна, тобто $\frac{\partial K_{ot}}{\partial K_o}$ і зробимо його аналіз. З огляду на вираз (3.2), отримаємо:

$$\frac{\partial K_{ot}}{\partial K_o} = \frac{\partial \psi}{\partial K_o}.$$

Враховуючи, що $\psi = \arcsin\left(\frac{V_{otx}}{\sqrt{V_{otx}^2 + V_{oty}^2}}\right)$, перша похідна цього виразу

приймає наступний вигляд:

$$\frac{\partial \psi}{\partial K_o} = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{V_{otx}^2}{(V_{otx}^2 + V_{oty}^2)}}} \frac{\partial}{\partial K_o} \left(\frac{V_{otx}}{\sqrt{V_{otx}^2 + V_{oty}^2}} \right).$$

Очевидно:

$$\frac{\partial}{\partial K_o} \left(\frac{V_{otx}}{\sqrt{V_{otx}^2 + V_{oty}^2}} \right) = \frac{\frac{\partial V_{otx}}{\partial K_o} (V_{otx}^2 + V_{oty}^2)^{1/2} - V_{otx}^2 \frac{\partial}{\partial K_o} [(V_{otx}^2 + V_{oty}^2)^{1/2}]}{V_{otx}^2 + V_{oty}^2}.$$

Враховуючи, що $\frac{\partial}{\partial K_o} [(V_{otx}^2 + V_{oty}^2)^{1/2}] = \frac{\frac{\partial V_{otx}}{\partial K_o} V_{otx} + \frac{\partial V_{oty}}{\partial K_o} V_{oty}}{\sqrt{V_{otx}^2 + V_{oty}^2}}$, і позна-

чаючи $\frac{\partial V_{otx}}{\partial K_o} = \dot{X}_k$ та $\frac{\partial V_{oty}}{\partial K_o} = \dot{Y}_k$, отримаємо вираз для шуканої похідної:

$$\frac{\partial K_{ot}}{\partial K_o} = \frac{\dot{X}_k (V_{otx}^2 + V_{oty}^2) - V_{otx} (V_{otx} \dot{X}_k + V_{oty} \dot{Y}_k)}{V_{oty} (V_{otx}^2 + V_{oty}^2)},$$

або після перетворень:

$$\frac{\partial K_{ot}}{\partial K_o} = \frac{\dot{X}_k V_{oty} - \dot{Y}_k V_{otx}}{V_{otx}^2 + V_{oty}^2}, \quad (3.3)$$

де $\dot{X}_k = V_o \cos K_o$, $\dot{Y}_k = -V_o \sin K_o$.

Дослідимо поведінку K_{ot} від курсу судна K_o , для чого достатньо дослідити знак чисельника виразу (3.3). Враховуємо, що:

$$V_{otx} = V_o \sin K_o - V_c \sin K_c \text{ та } V_{oty} = V_o \cos K_o - V_c \cos K_c,$$

звідки випливає:

$$\begin{aligned} (\dot{X}_k V_{oty} - \dot{Y}_k V_{otx}) &= V_o [V_o - V_c (\cos K_o \cos K_c - \sin K_o \sin K_c)] = \\ &= V_o [V_o - V_c \cos(K_o - K_c)]. \end{aligned} \quad (3.4)$$

Очевидно, знак $\frac{\partial K_{ot}}{\partial K_o}$ відповідає знаку виразу $V_o - V_c \cos(K_o - K_c)$.

Аналіз отриманого виразу (3.4) для першої похідної $\frac{\partial K_{ot}}{\partial K_o}$ показує, що справедлива нерівність $V_2 > V_1$ та при зміні курсу судном c_2 вираз $V_2 - V_1 \cos(K_2 - K_1)$, як і величина $\frac{\partial K_{ot}}{\partial K_2}$, додатні для всіх значень K_2 , Загальна тенденція зміни відносного курсу K_{ot} при повороті судна c_2 показана на рис. 3.2.

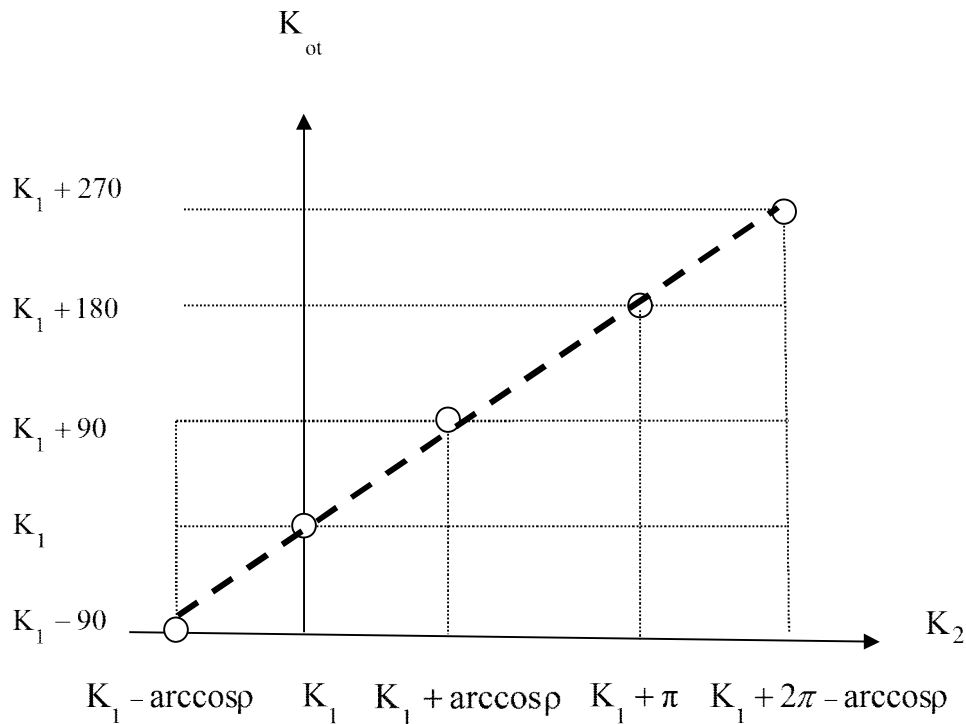


Рис. 3.2. Зміна відносного курсу K_{ot} при повороті судна c_2

Як показано на рис. 3.3, при зміні курсу K_2 відносний курс K_{ot} може приймати будь-які значення від 0 до 2π . Зокрема відносний курс приймає значення $K_1 + \frac{\pi}{2}$ при значенні курсу K_2 , що дорівнює $K_1 + \arccosp$, і значення відносного курсу $K_1 + \frac{3\pi}{2}$ досягається при рівності курсу $K_2 = K_1 - \arccosp$, де прийнято позначення $\rho = \frac{V_1}{V_2}$.

Від різниці значень курсів суден $\Delta K = K_1 - K_2$ залежить швидкість зміни відносного курсу. Тому з урахуванням виразу (3.3) отримаємо:

$$\frac{\partial K_{ot}}{\partial K_2} = \frac{V_1(V_1 - V_2 \cos \Delta K)}{V_1^2 + V_2^2 - 2 V_1 V_2 \cos \Delta K}.$$

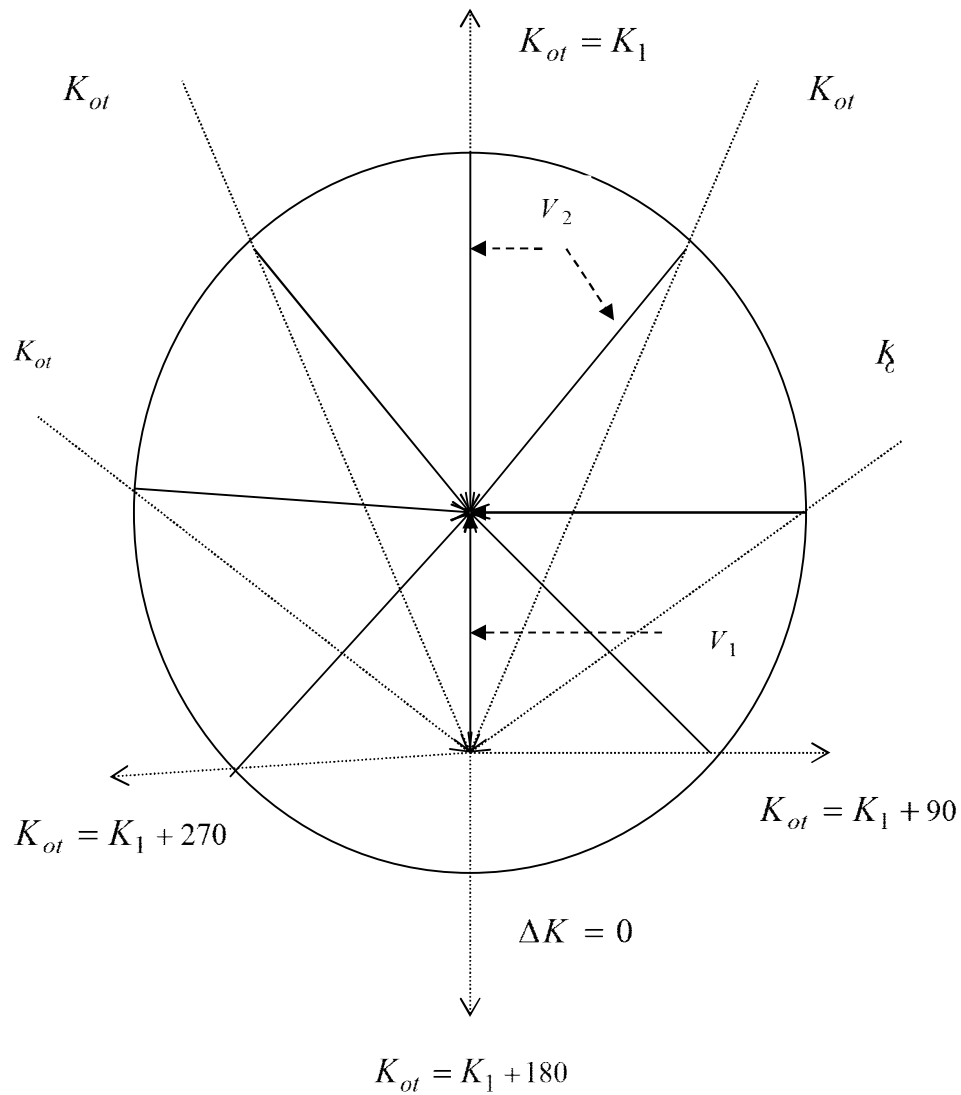


Рис. 3.3. Залежність відносного курсу K_{ot} від курсу K_2 судна c_2

Звертаємо увагу на те, що екстремальні значення $\frac{\partial K_{ot}}{\partial K_2}$ досягаються при

$\Delta K = 0$ та $\Delta K = 180$.

Знайдемо вирази для $\frac{\partial K_{ot}}{\partial K_2}$ при зазначених значеннях ΔK .

Для $\Delta K = 0$ отримаємо:

$$\frac{\partial K_{ot}}{\partial K_2}(\Delta K = 0) = \frac{V_1(V_1 - V_2)}{V_1^2 + V_2^2 - 2 V_1 V_2} = \frac{V_1(V_1 - V_2)}{(V_1 - V_2)^2},$$

або

$$\frac{\partial K_{ot}}{\partial K_1}(\Delta K = 0) = \frac{V_1}{(V_1 - V_2)}.$$

В разі $\Delta K = 180$ вираз для $\frac{\partial K_{ot}}{\partial K_2}$ приймає наступний вигляд:

$$\frac{\partial K_{ot}}{\partial K_2}(\Delta K = 180) = \frac{V_1(V_1 + V_2)}{V_1^2 + V_2^2 + 2 V_1 V_2} = \frac{V_1(V_1 + V_2)}{(V_1 + V_2)^2},$$

остаточно

$$\frac{\partial K_{ot}}{\partial K_2}(\Delta K = 180) = \frac{V_1}{(V_1 + V_2)}.$$

З отриманих формул випливає, що максимальна швидкість зміни $\frac{\partial K_{ot}}{\partial K_2}$ досягається при $\Delta K = 0$, а мінімальна – при $\Delta K = 180$.

На рис. 3.4 показана залежність відносного курсу K_{ot} від курсу судна K_2 при швидкостях суден $V_1 = 10$ вузлів, $V_2 = 20$ вузлів та $K_1 = 315^\circ$. На рисунку прийняті наступні позначення:

$$\begin{aligned} K_{21} &= K_1, K_{22} = K_1 + \pi, \\ K_{23} &= K_1 - \arccos \rho, K_{24} = K_1 + \arccos \rho, \\ K_{ot1} &= K_1 + \pi, K_{ot2} = K_1, \\ K_{ot3} &= K_1 + \frac{\pi}{2}, K_{ot4} = K_1 + \frac{3\pi}{2}. \end{aligned}$$

Відносна швидкість V_{ot} , як показано на рис. 3.5, при зміні курсу K_2 досягає екстремальних значень $V_{ot1} = \min V_{ot} = V_2 - V_1$ при курсі $K_2 = K_{21} = K_1$

та $V_{ot2} = \max V_{ot} = V_2 + V_1$ при курсі $K_2 = K_{22} = K_1 + \pi$.

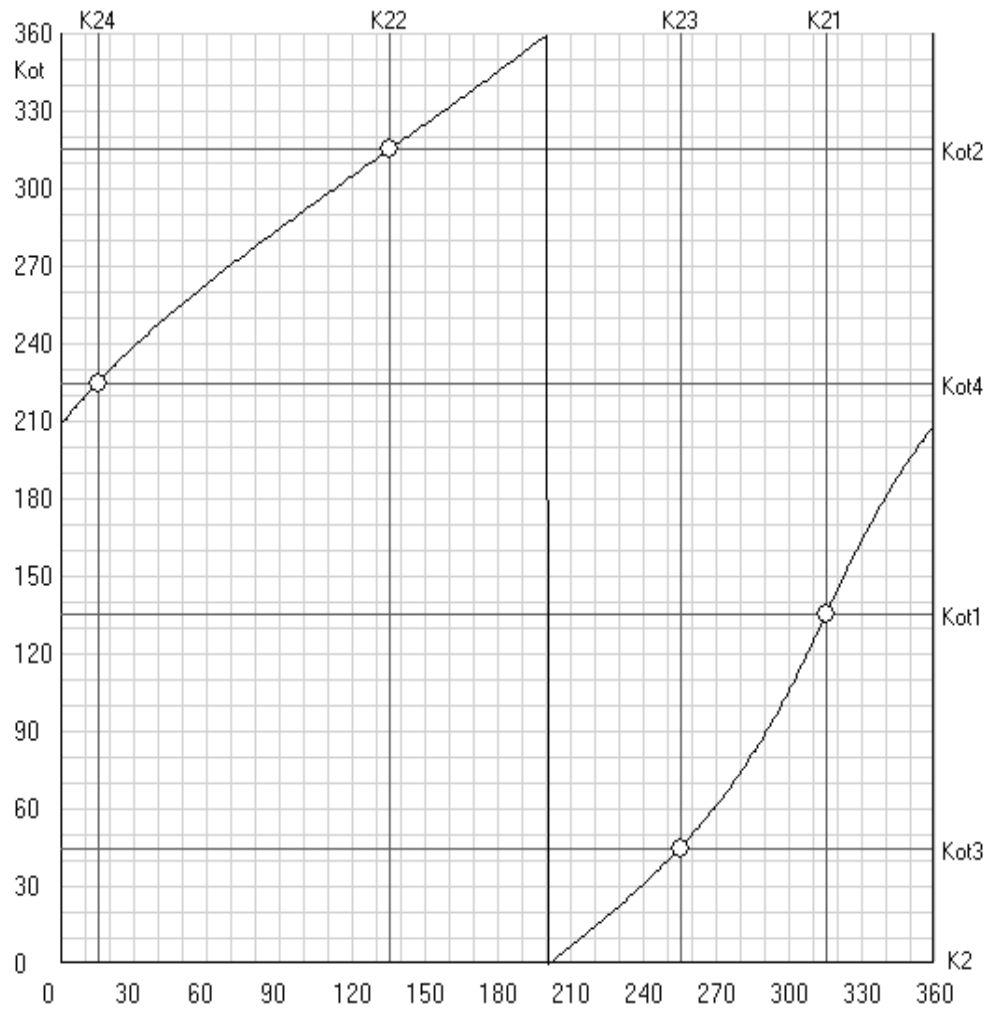


Рис. 3.4. Залежність відносного курсу K_{ot} від курсу K_2

Відносна швидкість V_{ot} приймає значення $V_{ot3} = V_2$ при значенні курсу K_2 , що задовольняє рівності:

$$V_{ot} = [V_1^2 + V_2^2 - 2V_1V_2\cos(K_1 - K_2)]^{1/2} = V_2,$$

або

$$V_1^2 - 2V_1V_2\cos(K_1 - K_2) = 0,$$

звідки

$$\cos(K_1 - K_2) = \frac{V_1^2}{2V_1V_2} = \frac{\rho}{2}.$$

Отже,

$$K_{23} = K_1 - \arccos \frac{\rho}{2} \text{ та } K_{24} = K_1 + \arccos \frac{\rho}{2}.$$

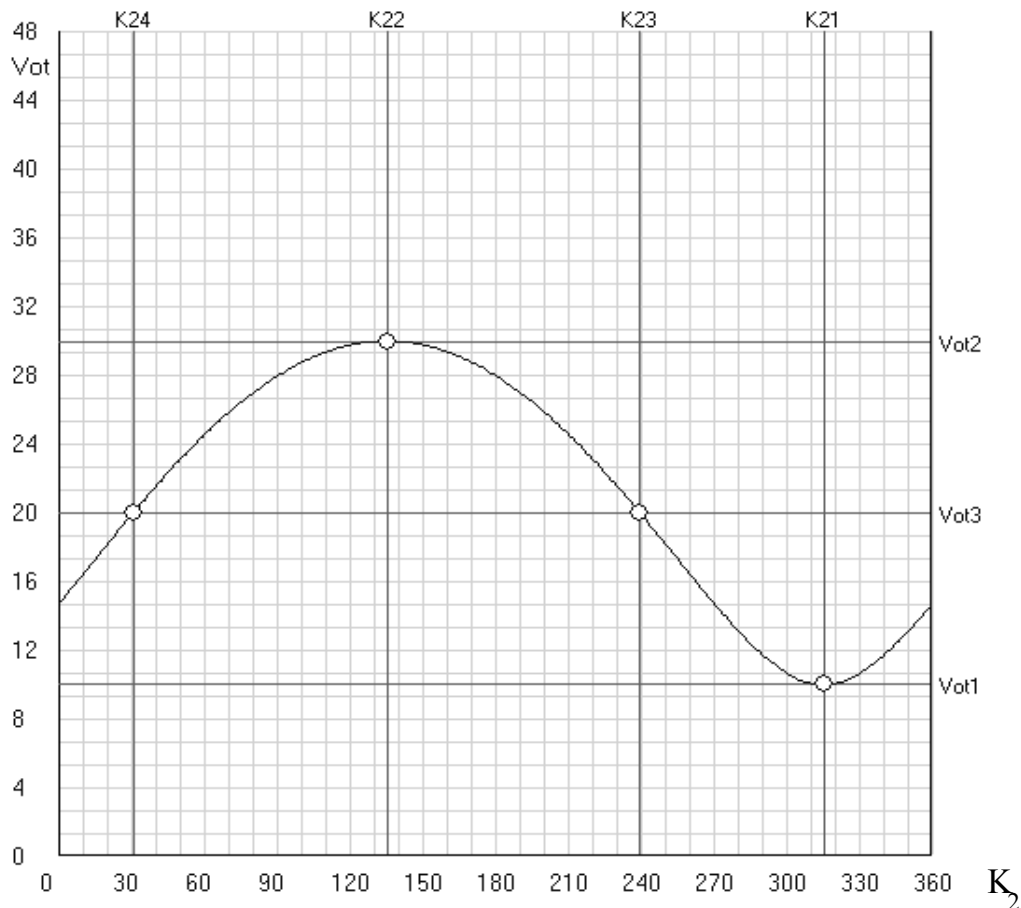


Рис. 3.5. Залежність відносної швидкості V_{ot} від курсу судна c_2

У разі повороту судна c_1 при сталому курсі K_2 судна c_2 , як впливає з виразу (3.4), вираз $V_2 - V_1 \cos(K_2 - K_1)$ і перша похідна $\frac{\partial K_{ot}}{\partial K_1}$ може мати як додатне, так і від'ємне значення, а область значень K_{ot} обмежується екстремальними значеннями, які позначені K_{otmin} та K_{otmax} (рис. 3.6).

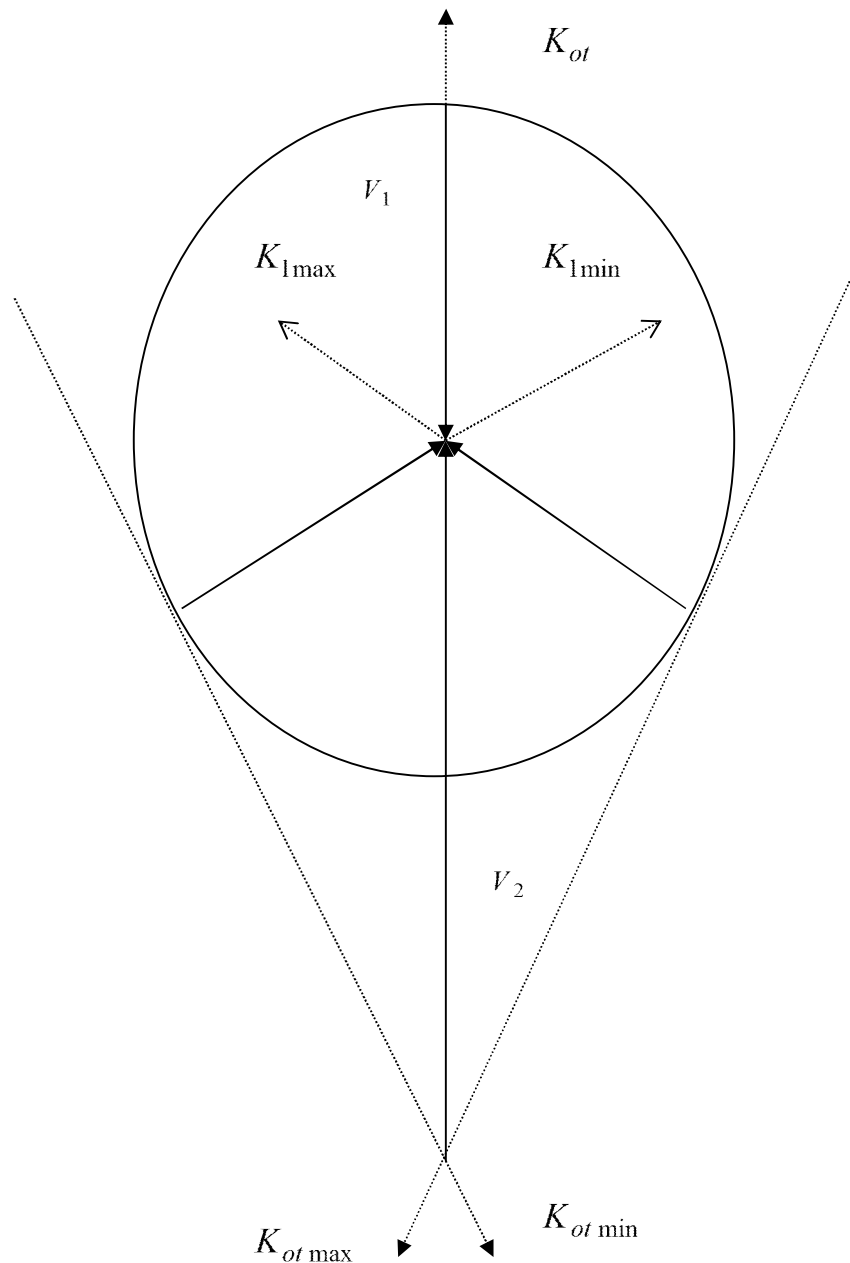


Рис. 3.6. Зміна відносного курсу K_{ot} в залежності від курсу K_1

Як видно з рис. 3.6, при зростанні курсу K_1 , в залежності від його поточного значення відносний курс K_{ot} може як збільшуватися, так і зменшуватися.

Так, при зростанні курсу K_1 від значення K_{1min} до значення K_{1max} через значення $K_2 + 180$ відносний курс K_{ot} також буде збільшуватися від ве-

личини K_{otmin} до K_{otmax} . Таким чином, $\frac{\partial K_{ot}}{\partial K_1} > 0$ при $K_1 \in [K_{1min}, K_{1max}]$.

При подальшому збільшенні курсу K_1 від K_{1max} до K_{1min} через значення K_2 відносний курс K_{ot} зменшується, тобто $\frac{\partial K_{ot}}{\partial K_1} < 0$ при $K_1 \in [K_{1max}, K_{1min}]$.

Екстремальним значенням відносних курсів K_{otmin} та K_{otmax} відповідають курси судна K_{1min} та K_{1max} , які знаходяться з умови обернення першої похідної $\frac{\partial K_{ot}}{\partial K_1}$ в нуль, тобто з урахуванням (3.4) з рівняння:

$$V_1 - V_2 \cos(K_1 - K_2) = 0$$

або

$$\cos(K_1 - K_2) = \frac{V_1}{V_2} = \rho.$$

Дане рівняння має два корені:

$$K_{11} = K_2 + \arccos \rho, \quad K_{12} = K_2 - \arccos \rho. \quad (3.5)$$

Необхідно визначити відповідність отриманих значень курсів судна s_1 екстремальним відносним курсам K_{otmin} та K_{otmax} . Ця невизначеність дозволяється при перевірці знаків екстремумів другої похідної.

Використовуючи раніше отримані залежності і формулу (3.3), знаходимо вираз для другої похідної, яка має такий вигляд:

$$\frac{\partial^2 K_{ot}}{\partial K_1^2} = \frac{\partial}{\partial K_1} \left\{ \frac{V_1 [V_1 - V_2 \cos(K_1 - K_2)]}{V_{ot}^2} \right\} = \frac{V_1 V_2 (V_2^2 - V_1^2)}{V_{ot}^4} \sin(K_1 - K_2).$$

Підставляємо в останній вираз формули для K_{11} та K_{12} з (3.5), отримаємо:

$$\begin{aligned}\frac{\partial^2 K_{ot}}{\partial K_1^2} &= \frac{V_1 V_2 (V_2^2 - V_1^2)}{V_{ot}^4} \sin(K_2 + \arccos \rho - K_2) = \\ &= \frac{V_1 V_2 (V_2^2 - V_1^2)}{V_{ot}^4} \sin(\arccos \rho) > 0, \text{ при } K_1 = K_{11}; \\ \frac{\partial^2 K_{ot}}{\partial K_1^2} &= \frac{V_1 V_2 (V_2^2 - V_1^2)}{V_{ot}^4} \sin(K_2 - \arccos \rho - K_2) = \\ &= \frac{V_1 V_2 (V_2^2 - V_1^2)}{V_{ot}^4} \sin(-\arccos \rho) < 0, \text{ при } K_1 = K_{12};\end{aligned}$$

Як випливає з наведених формул, мінімальне значення відносного курсу досягається при $K_1 = K_{11}$, оскільки в цьому випадку друга похідна додатна, а максимальне значення – при $K_1 = K_{12}$, коли друга похідна від'ємна. Отже, справедливі вирази:

$$K_{1min} = K_2 + \arccos \rho \text{ та } K_{1max} = K_2 - \arccos \rho.$$

Знайдемо значення для екстремальних значень відносного курсу K_{otmin} та K_{otmax} , скориставшись залежністю (3.2):

$$\operatorname{tg} K_{ot} = \frac{V_1 \sin K_1 - V_2 \sin K_2}{V_1 \cos K_1 - V_2 \cos K_2}. \quad (3.6)$$

Підставляючи в (3.6) вираз для K_{1min} , отримаємо:

$$\operatorname{tg} K_{\text{otmin}} = \frac{V_1 \sin(K_2 + \arccos \rho) - V_2 \sin K_2}{V_1 \cos(K_2 + \arccos \rho) - V_2 \cos K_2}. \quad (3.7)$$

Враховуючи, що $\rho = \frac{V_1}{V_2}$, перетворимо чисельник останнього виразу:

$$\begin{aligned} V_1 \left[\frac{V_1}{V_2} \sin K_2 + \frac{(V_2^2 - V_1^2)^{1/2}}{V_2} \cos K_2 \right] - V_2 \sin K_2 = \\ V_2^{-1} [V_1 (V_2^2 - V_1^2)^{1/2} \cos K_2 - (V_2^2 - V_1^2) \sin K_2] = (V_2^2 - V_1^2)^{1/2} \sin(\psi - K_2), \end{aligned}$$

де $\psi = \arcsin \rho$ – початкова фаза.

Аналогічно перетворюємо знаменник виразу (3.7):

$$\begin{aligned} V_1 \cos(K_2 + \arccos \rho) - V_2 \cos K_2 = V_1 \left[\frac{V_1}{V_2} \cos K_2 - \frac{(V_2^2 - V_1^2)^{1/2}}{V_2} \sin K_2 \right] - \\ - V_2 \cos K_2 = (V_2^2 - V_1^2)^{1/2} \cos(\psi - K_2). \end{aligned}$$

Підставляючи отримані вирази для чисельника і знаменника в (3.7), знаходимо:

$$\operatorname{tg} K_{\text{otmin}} = - \frac{(V_2^2 - V_1^2)^{1/2} \sin(\psi - K_2)}{(V_2^2 - V_1^2)^{1/2} \cos(\psi - K_2)},$$

звідки остаточно отримаємо:

$$\operatorname{tg} K_{\text{otmin}} = -\operatorname{tg}(\psi - K_2).$$

Дане рівняння має два корені:

$$K_{\text{otmin}1} = K_2 - \psi \quad \text{ТА} \quad K_{\text{otmin}2} = \pi + K_2 - \psi.$$

Враховуючи, що у відносному переміщенні вибрано нерухомим судно c_2 , чому відповідає K_{otmin2} , то остаточно отримаємо:

$$K_{otmin} = \pi + K_2 - \arcsin \rho.$$

Аналогічно знаходимо вираз для K_{otmax} , який має наступний вигляд:

$$K_{otmax} = \pi + K_2 + \arcsin \rho.$$

Отже, значення екстремальних відносних курсів у випадку, коли судно c_1 змінює курс, а його швидкість має менше значення, визначаються наступними виразами:

$$K_{otmin} = \pi + K_2 - \arcsin \rho \text{ та } K_{otmax} = \pi + K_2 + \arcsin \rho. \quad (3.8)$$

Отже, при зміні курсу K_1 судна c_1 у діапазоні від 0 до 2π відносний курс K_{ot} буде приймати значення з діапазону $[K_{otmin}, K_{otmax}]$, як показано на рис. 3.7.

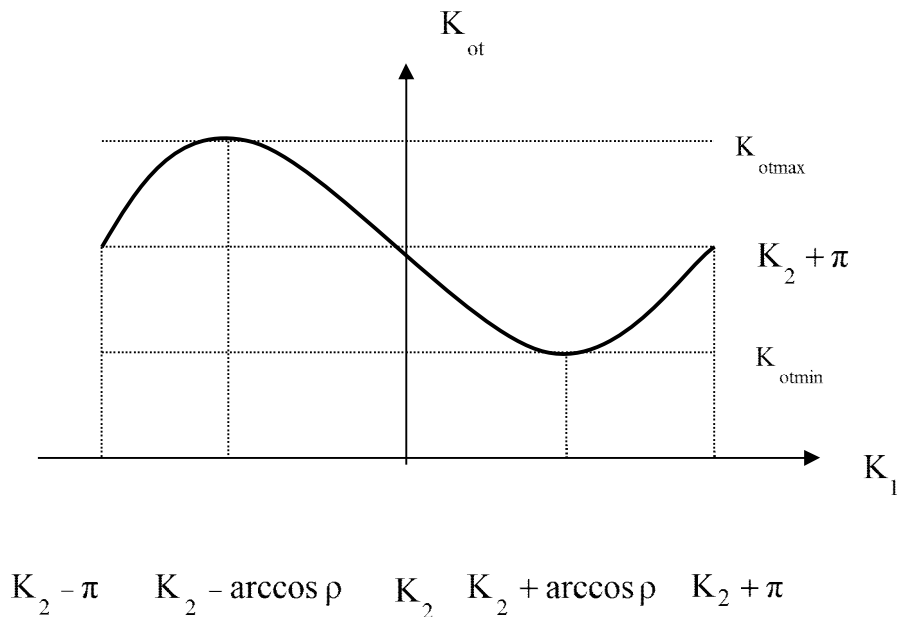


Рис. 3.7. Залежність відносного курсу K_{ot} від курсу K_1

На рис. 3.8 зображена залежність відносного курсу K_{ot} від курсу K_1 судна c_1 , при цьому в якості прикладу прийняті наступні параметри руху

$V_1 = 10$ вузлів, $V_2 = 20$ вузлів та $K_2 = 0^\circ$.

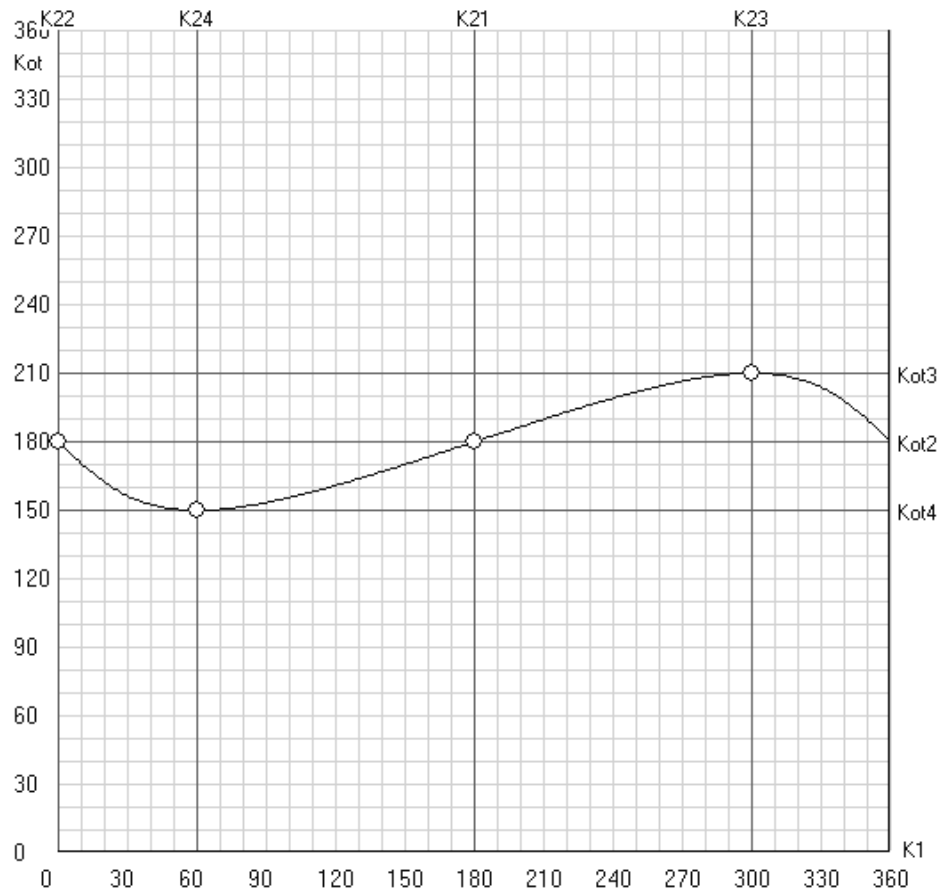


Рис. 3.8. Зміна відносного курсу K_{ot} при повороті судна c_1

На наведеному рисунку прийняті наступні позначення курсу K_1 судна c_1 та відносного курсу K_{ot} :

$$K_{21} = K_2 - \pi, K_{22} = K_2, K_{23} = K_2 - \arccos \rho, K_{24} = K_2 + \arccos \rho,$$

$$K_{ot1} = K_2 + \pi, K_{ot2} = K_2 + \pi, K_{ot3} = \pi + K_2 + \arcsin \rho,$$

$$K_{ot4} = \pi + K_2 - \arcsin \rho.$$

На рис. 3.9 показана залежність відносної швидкості V_{ot} від курсу K_1 при тих же параметрах руху.

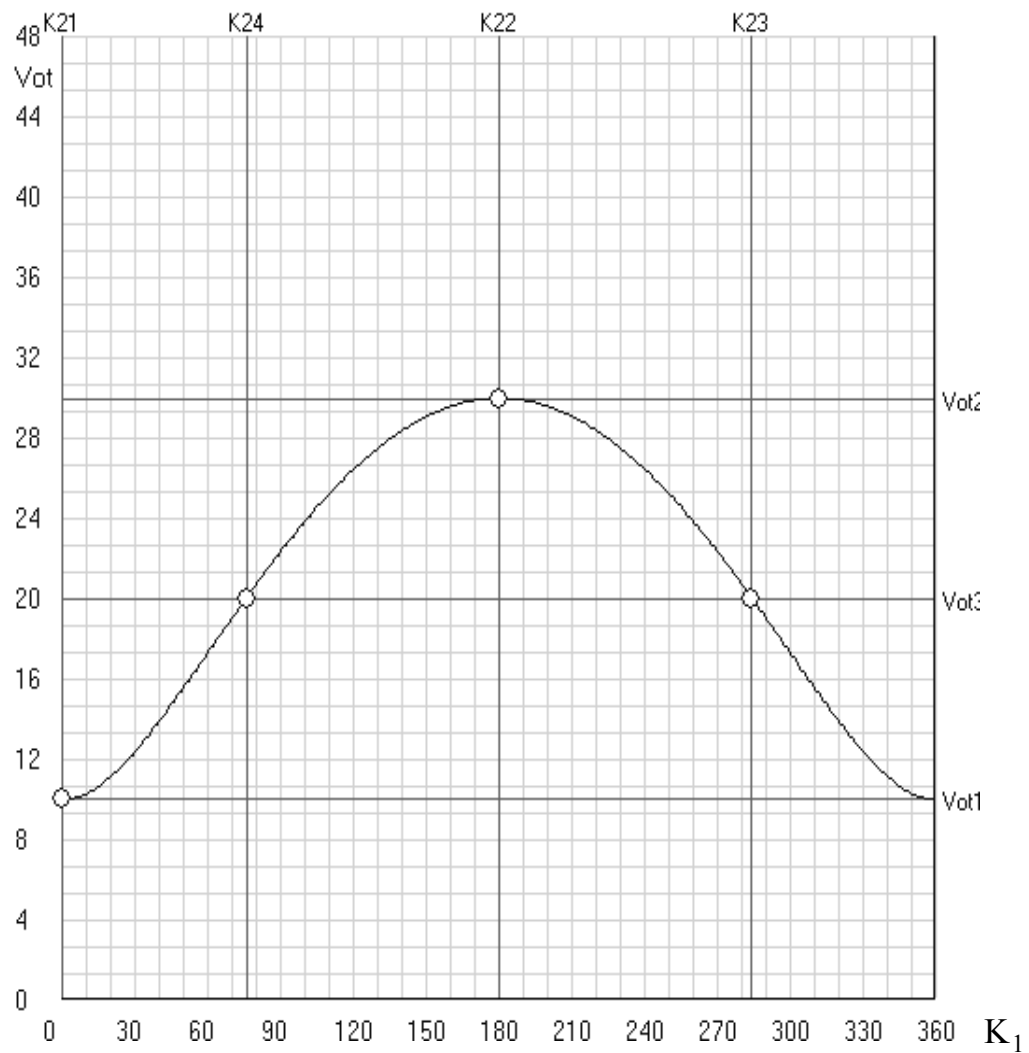


Рис. 3.9. Залежність відносного курсу V_{ot} від курсу K_1

При цьому:

$$K_{21} = K_2, K_{22} = K_2 + \pi, K_{23} = K_1 - \arccos \frac{\rho}{2}, K_{24} = K_1 + \arccos \frac{\rho}{2}$$

$$V_{ot1} = V_2 - V_1, V_{ot2} = V_2 + V_1 \text{ та } V_{ot3} = V_2.$$

У випадку, коли швидкості суден однакові, тобто $V_2 = V_1$, то незалежно від того, яке з суден c_1 та c_2 змінює курс, залежність відносного курсу K_{ot} від курсу K_o судна, що маневрує, причому через K_c позначений курс судна, що зберігає параметри руху, представлена на рис. 3.10.

З рисунку випливає, що при зміні курсу судна K_o від 0 до 2π відносний

курс приймає значення $K_{ot} \in [K_c + \pi/2, K_c + 3\pi/2]$, причому при $K_o = K_c$ відносний курс K_{ot} стрибкоподібно змінюється на 180° .

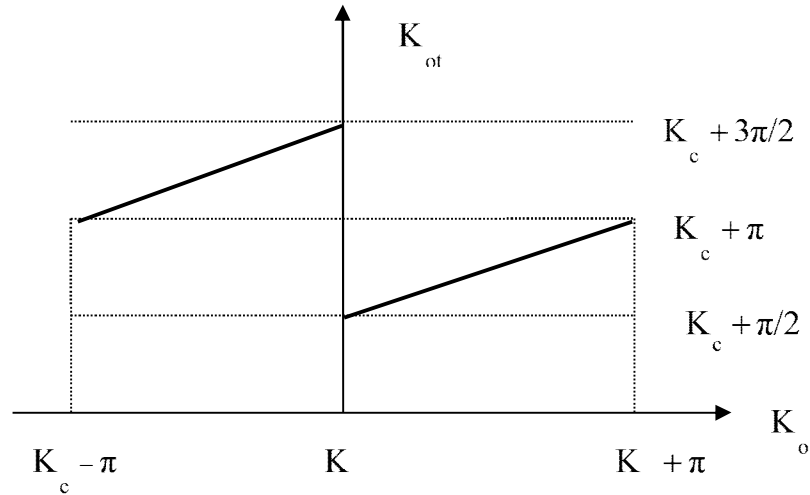


Рис. 3.10. Залежність K_{ot} від курсу судна K_o при $\rho = 1$

На рис. 3.11 показана залежність відносної швидкості V_{ot} від курсу судна K_o при $\rho = 1$, причому в якості прикладу прийняті наступні значення параметрів руху $V_1 = 20$ вузлів, $V_2 = 20$ вузлів і $K_2 = 180^\circ$.

Знайдемо аналітичний вираз залежності справжніх курсів суден c_1 та c_2 від відносного курсу K_{ot} . Для цього використаємо вираз (3.6):

$$\operatorname{tg} K_{ot} = \frac{V_o \sin K_o - V_c \sin K_c}{V_o \cos K_o - V_c \cos K_c},$$

де V_o та K_o – параметри рухомого в відносному русі судна;

V_c та K_c – параметри нерухомого у відносному русі судна.

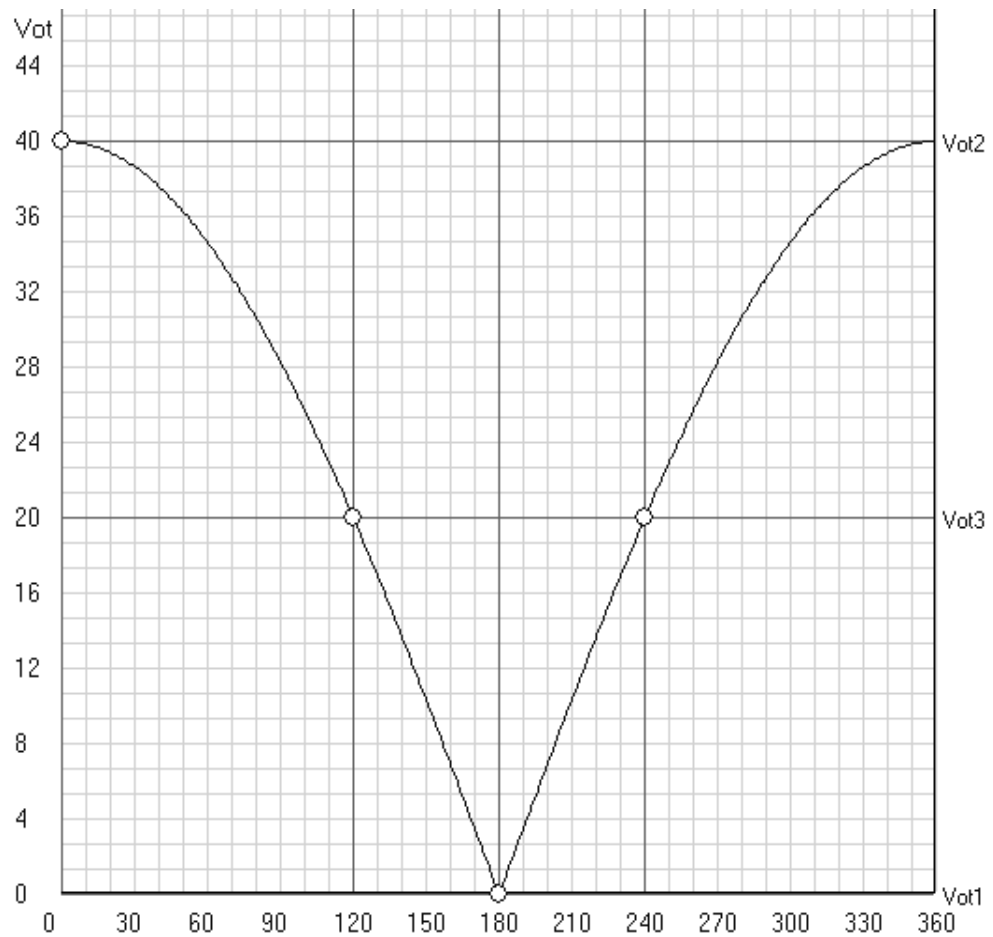


Рис. 3.11. Залежність відносного курсу V_{ot} від курсу судна K_o при $\rho = 1$

З останнього виразу отримаємо:

$$\operatorname{tg} K_{ot} (V_o \cos K_o - V_c \cos K_c) = V_o \sin K_o - V_c \sin K_c,$$

звідки

$$V_o \cos K_o \operatorname{tg} K_{ot} - V_c \cos K_c \operatorname{tg} K_{ot} = V_o \sin K_o - V_c \sin K_c,$$

$$V_o \cos K_o \operatorname{tg} K_{ot} - V_o \sin K_o = V_c \cos K_c \operatorname{tg} K_{ot} - V_c \sin K_c,$$

або

$$V_o (\cos K_o \operatorname{tg} K_{ot} - \sin K_o) = V_c (\cos K_c \operatorname{tg} K_{ot} - \sin K_c).$$

Помножуючи обидві частини останнього рівняння на -1 , отримаємо:

$$V_o (\sin K_o - \cos K_o \operatorname{tg} K_{ot}) = V_c (\sin K_c - \cos K_c \operatorname{tg} K_{ot}).$$

Перепишемо останній вираз у вигляді:

$$\sin K_o - \cos K_o \operatorname{tg} K_{ot} = \rho^{-1} (\sin K_c - \cos K_c \operatorname{tg} K_{ot}),$$

$$\text{де } \rho = \frac{V_o}{V_c}.$$

Помножуючи останню рівність на $\cos K_{ot}$, отримаємо:

$$\sin K_o \cos K_{ot} - \cos K_o \sin K_{ot} = \rho^{-1} (\sin K_c \cos K_{ot} - \cos K_c \sin K_{ot}),$$

або з урахуванням елементарних залежностей знаходимо:

$$\sin(K_o - K_{ot}) = \rho^{-1} \sin(K_c - K_{ot}).$$

Дане рівняння, що вирішується відносно K_o , має два корені:

$$K_{o1} = K_{ot} + \arcsin [\rho^{-1} \sin(K_c - K_{ot})], \quad (3.9)$$

$$K_{o2} = K_{ot} + \pi - \arcsin [\rho^{-1} \sin(K_c - K_{ot})]. \quad (3.10)$$

З рис. 3.7 випливає, що один з отриманих коренів має місце при $\frac{\partial K_{ot}}{\partial K_o} > 0$, а інший – в протилежному випадку. Тому слід встановити відпові-

дність між значеннями знаку виразу $\frac{\partial K_{ot}}{\partial K_o}$ і отриманими коренями K_{o1} та

K_{o2} . Для цього визначаємо знаки похідних $\frac{\partial K_{ot}}{\partial K_{o1}}$ та $\frac{\partial K_{ot}}{\partial K_{o2}}$.

Спочатку знайдемо вираз для похідної $\frac{\partial K_{ot}}{\partial K_{o1}}$, для чого рівняння (3.9) диференціюємо по перемінній K_{o1} :

$$1 = \frac{\partial K_{ot}}{\partial K_{o1}} + \frac{\rho^{-1} \cos(K_c - K_{ot})}{\sqrt{1 - \rho^{-2} \sin^2(K_c - K_{ot})}} \frac{\partial K_{ot}}{\partial K_{o1}},$$

або

$$\frac{\partial K_{ot}}{\partial K_{o1}} = \left[1 + \frac{\rho^{-1} \cos(K_c - K_{ot})}{\sqrt{1 - \rho^{-2} \sin^2(K_c - K_{ot})}} \right]^{-1} = (1 + q)^{-1},$$

де $q = \frac{\rho^{-1} \cos(K_c - K_{ot})}{\sqrt{1 - \rho^{-2} \sin^2(K_c - K_{ot})}}$. Таким чином, $\frac{\partial K_{ot}}{\partial K_{o1}} = (1 + q)^{-1}$.

Аналізуючи вираз для q отримаємо, що при $\rho > 1$ модуль значення q не перевищує 1 незалежно від значень інших перемінних. Отже, незалежно від знаку q справедливою є нерівність $\frac{\partial K_{ot}}{\partial K_{o1}} > 0$.

Знайдемо вираз для похідної $\frac{\partial K_{ot}}{\partial K_{o2}}$, з цією метою рівняння (3.10) диференціюємо по K_{o2} :

$$1 = \frac{\partial K_{ot}}{\partial K_{o2}} - \frac{\rho^{-1} \cos(K_c - K_{ot})}{\sqrt{1 - \rho^{-2} \sin^2(K_c - K_{ot})}} \frac{\partial K_{ot}}{\partial K_{o2}},$$

або

$$\frac{\partial K_{ot}}{\partial K_{o2}} = \left[1 - \frac{\rho^{-1} \cos(K_c - K_{ot})}{\sqrt{1 - \rho^{-2} \sin^2(K_c - K_{ot})}} \right]^{-1} = (1 - q)^{-1},$$

тому

$$\frac{\partial K_{ot}}{\partial K_{o2}} = (1 - q)^{-1}. \quad (3.11)$$

У випадку $\rho < 1$ курси судна K_o , укладені в інтервалі від $K_c - \arccos \rho$ до $K_c + \arccos \rho$, при яких $\frac{\partial K_{ot}}{\partial K_o} < 0$, будемо називати попутними, а решту, для яких $\frac{\partial K_{ot}}{\partial K_o} > 0$, – зустрічними.

Аналіз виразу (3.11) показує, що $\frac{\partial K_{ot}}{\partial K_{o2}} < 0$ в разі $\rho < 1$ і при проходженні судна попутними курсами. Наголошуємо, що при попутних курсах відносне ухилення Δ від'ємне, тобто при збільшенні курсу судна відносний курс зменшується і навпаки. Зустрічні курси характеризуються додатним значенням Δ .

Таким чином, для судна, яке слідує з більшою швидкістю c_2 має місце $\rho > 1$ та існує однозначне відображення множини відносних курсів в множину істинних курсів судна c_2 , так як знак першої похідної $\frac{\partial K_{ot}}{\partial K_2} > 0$ для всіх значень курсу судна K_2 , причому залежність має такий вигляд:

$$K_2 = K_{ot} + \arcsin [p^{-1} \sin(K_1 - K_{ot})].$$

У разі судна з меншою швидкістю c_1 значення $\rho < 1$ (рис. 3.12) і відображення множини відносних курсів у множину істинних курсів судна c_1 не є однозначним, так як перша похідна $\frac{\partial K_{ot}}{\partial K_1}$ може мати як додатний, так і від'ємний знаки, тобто кожному відносному курсу, крім екстремальних, відповідає два значення K_{11} та K_{12} істинного курсу судна c_1 . Причому, справедливо співвідношення:

$$K_1 = K_{ot} + \arcsin [p^{-1} \sin(K_2 - K_{ot})], \text{ при } \Delta > 0,$$

$$K_1 = K_{ot} + \pi - \arcsin [p^{-1} \sin(K_2 - K_{ot})], \text{ при } \Delta < 0.$$

У разі, коли швидкості суден рівні, тобто $\rho = 1$, отримаємо:

$$K_o = 2K_{ot} + \pi - K_c.$$

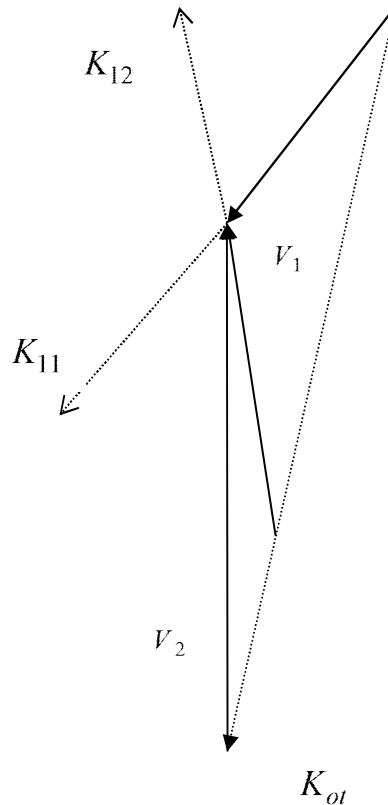


Рис. 3.12. Відповідність між відносним K_{ot} та істинним K_1 курсами

3.3. Аналітичний опис ситуації небезпечного зближення суден елементарної групи

Елементарну групу суден розглядаємо з позицій безпечного руху для попередження зіткнення. При цьому враховуємо, що зіткнення відбувається тоді, коли дистанцію між рухомими суднами можна порівняти з габаритами суден. Для попередження зіткнення необхідно прогнозувати можливе значення дистанції найкоротшого зближення D_{min} (рис. 3.13) і зіставити його з гранич-

но допустимою дистанцією D_{dop} , яка забезпечує безпечне розходження.

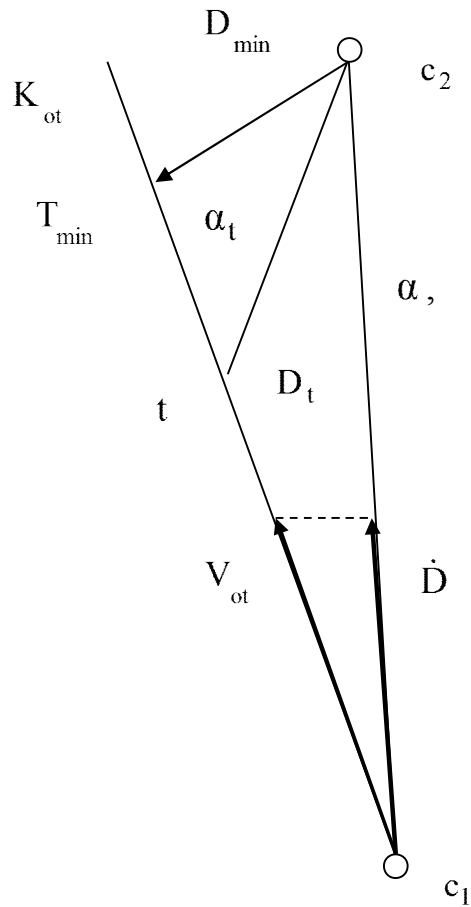


Рис. 3.13. До визначення величин $\dot{D}$ та D_{min}

З рисунку випливає:

$$D_{\text{min}} = \Delta_n D \sin(K_{\text{ot}} - \alpha), \quad (3.12)$$

де Δ_n – співмножник, що забезпечує додатне значення D_{min} .

Момент часу досягнення значення D_{min} , – час найкоротшого зближення

T_{min} , визначається виразом:

$$T_{\text{min}} = \frac{D \cos(K_{\text{ot}} - \alpha)}{V_{\text{ot}}}.$$

Знайдемо поточні значення дистанції D_{mint} і часу T_{mint} найкоротшого зближення в довільний момент часу $t < T_{\text{min}}$, вважаючи, що параметри руху суден є незмінними, тобто K_{ot} та V_{ot} постійні.

Поточні значення пеленга α_t і дистанції D_t змінюються зі зміною часу. З рис. 3.13 випливає:

$$D_t = \sqrt{V_{\text{ot}}^2 t^2 + D_{\text{min}}^2 - 2D_{\text{min}} V_{\text{ot}} t \cos(K_{\text{ot}} - \alpha)}, \quad (3.13)$$

$$\alpha_t = K_{\text{ot}} + \arcsin \frac{D_{\text{min}}}{D_t},$$

а також

$$\alpha_t = K_{\text{ot}} + \arccos \frac{V_{\text{ot}}(T_{\text{min}} - t)}{D_t}.$$

Тому $D_{\text{mint}} = D_t \sin(K_{\text{ot}} - \alpha_t)$ і, підставляючи перший вираз для α_t , отримаємо:

$$D_{\text{mint}} = D_t \sin(K_{\text{ot}} - K_{\text{ot}} - \arcsin \frac{D_{\text{min}}}{D_t}) = D_{\text{min}}.$$

В свою чергу, $T_{\text{mint}} = \frac{D_t \cos(K_{\text{ot}} - \alpha_t)}{V_{\text{ot}}}$ або, підставляючи другий вираз для

α_t , отримаємо:

$$T_{\text{mint}} = \frac{D_t \cos[K_{\text{ot}} - K_{\text{ot}} - \arccos \frac{V_{\text{ot}}(T_{\text{min}} - t)}{D_t}]}{V_{\text{ot}}} = T_{\text{min}} - t.$$

Отже, при $t < T_{\text{min}}$ і сталих параметрах руху обох суден дистанція найкоротшого зближення залишається не змінною, а час найкоротшого зближення зменшується, звертаючись в 0, якщо $t = T_{\text{min}}$.

Множина станів елементарної групи суден з точки зору безпеки розходження можна розділяти на підмножини за різними ознаками. Перша ознака можливого зіткнення суден - це їхнє зближення. Тоді множину станів елементарної групи суден розділимо на підмножину суден, що зближуються, та підмножину суден, які віддаляються. Параметр даної ознаки - це швидкість зміни відстані між суднами $\dot{D}$.

Враховуючи, що у відносному русі нерухомим є судно s_2 , то за допомогою рис. 3.13 отримаємо:

$$\dot{D} = -V_{ot} \cos(\alpha - K_{ot}).$$

Звертаємо увагу при зближенні суден $\dot{D} < 0$, що справедливо при $0 \leq \alpha - K_{ot} < \pi/2$. Так як рівність $\alpha - K_{ot} = \pi/2$ має місце в момент часу $t = T_{min}$, то до моменту часу T_{min} знак $\dot{D}$ не змінюється.

Вважаючи, що швидкості суден V_1 та V_2 є незмінними, розглянемо залежність швидкості $\dot{D}$ від курсів суден K_1 та K_2 . З останнього виразу отримаємо:

$$\dot{D} = -V_{ot} [\cos K_{ot} \cos \alpha + \sin K_{ot} \sin \alpha]. \quad (3.14)$$

З огляду на вираз (3.6), можна записати:

$$\begin{aligned} \sin K_{ot} &= \frac{V_1 \sin K_1 - V_2 \sin K_2}{\sqrt{(V_1 \sin K_1 - V_2 \sin K_2)^2 + (V_1 \cos K_1 - V_2 \cos K_2)^2}} \Rightarrow \\ &\Rightarrow \frac{V_1 \sin K_1 - V_2 \sin K_2}{V_{ot}}, \\ \cos K_{ot} &= \frac{V_1 \cos K_1 - V_2 \cos K_2}{V_{ot}}. \end{aligned}$$

З урахуванням цього вираз (3.14) набирає вигляду:

$$\dot{D} = -[(V_1 \cos K_1 - V_2 \cos K_2) \cos \alpha + (V_1 \sin K_1 - V_2 \sin K_2) \sin \alpha].$$

Розкриємо дужки і групуємо:

$$\dot{D} = -[V_1 (\cos K_1 \cos \alpha + \sin K_1 \sin \alpha) - V_2 (\cos K_2 \cos \alpha + \sin K_2 \sin \alpha)],$$

або

$$\dot{D} = -[V_1 \cos(K_1 - \alpha) - V_2 \cos(K_2 - \alpha)].$$

Остаточний вираз для визначення зміни дистанції $\dot{D}$ має наступний вигляд:

$$\dot{D} = V_2 \cos(K_2 - \alpha) - V_1 \cos(K_1 - \alpha).$$

Поділ на підмножини суден, що зближуються та віддаляються, проводиться по межі пар курсів (K_1, K_2) , при яких $\dot{D} = 0$, чому відповідає рівняння:

$$V_2 \cos(K_2 - \alpha) - V_1 \cos(K_1 - \alpha) = 0,$$

або

$$V_2 \cos(K_2 - \alpha) = V_1 \cos(K_1 - \alpha).$$

З останнього співвідношення випливає:

$$\cos(K_2 - \alpha) = \frac{V_1}{V_2} \cos(K_1 - \alpha),$$

звідки

$$K_{21} = \alpha + \arccos\left[\frac{V_1}{V_2} \cos(K_1 - \alpha)\right], \quad (3.15)$$

$$K_{22} = \alpha - \arccos\left[\frac{V_1}{V_2} \cos(K_1 - \alpha)\right]. \quad (3.16)$$

Вирази (3.15) і (3.16) представляють межі між областями суден, що зближуються і віддаляються. Вони показані на рис. 3.14, причому область всередині кордонів відповідає ситуації зближення суден. Межі розраховані для параметрів $V_1 = 10$ вуз., $V_2 = 20$ вуз., $\alpha = 0^\circ$.

У разі рівності швидкостей суден $V_2 = V_1$ межі області зближення вироджуються в прямі лінії, що перетинаються. Зближенню суден відповідають верхня і нижня частини області.

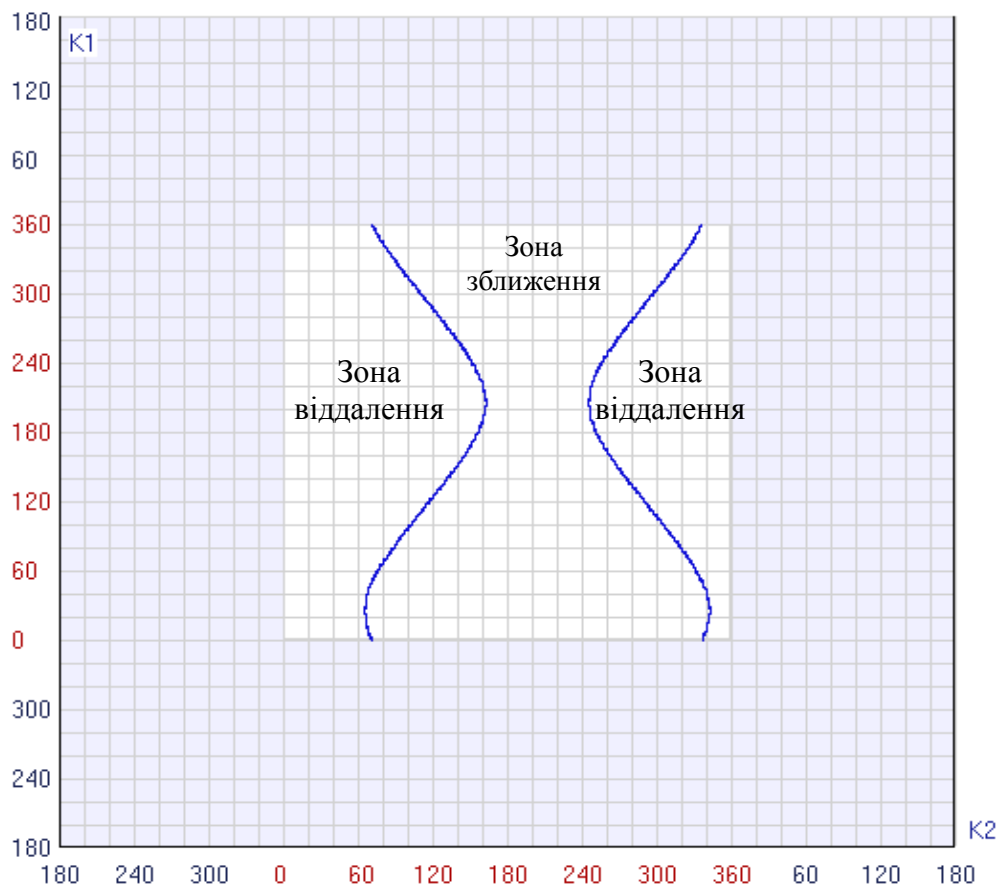


Рис. 3.14. Межі області зближення суден при $V_2 > V_1$

На рис. 3.15 показані прямолінійні межі області, для прикладу обрано такі параметри $V_1 = 20$ вуз., $V_2 = 20$ вуз. та $\alpha = 0^\circ$.

Якщо судна зближуються ($\dot{D} < 0$), то слід з'ясувати, чи існує небезпека зіткнення, тобто ситуаційне збурення. Для цього необхідно порівняти прогнозоване значення дистанції найкоротшого зближення $D_{\min}$ з гранично допустимою дистанцією D_d . Її значення визначається формою і розмірами судно-

вої безпечної області.

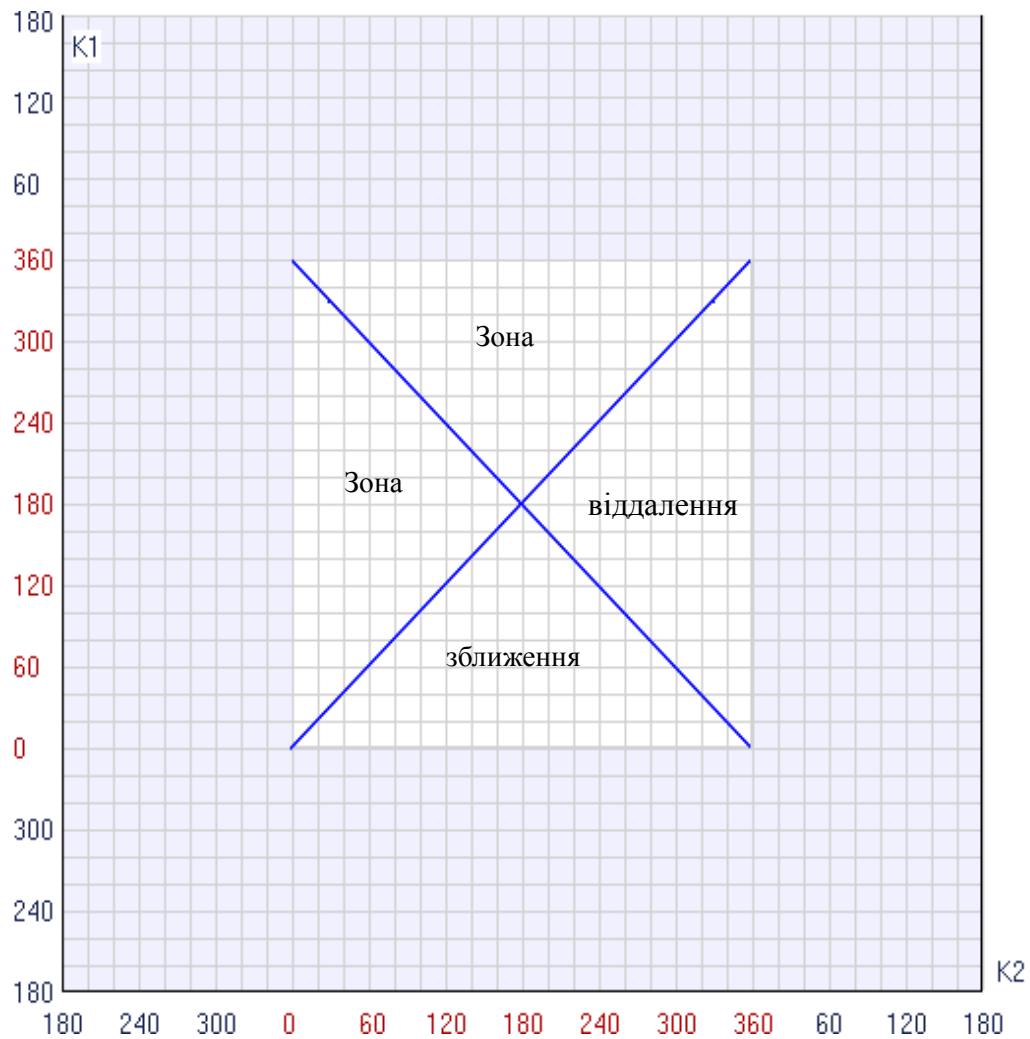


Рис. 3.15. Межі області зближення суден при $V_2 = V_1$

3.4. Формалізація областей неприпустимих значень параметрів руху суден

Розглянемо ситуацію зближення двох суден, взаємне положення яких в початковий момент часу характеризується пеленгом і дистанцією D , а взаємне переміщення – відносним курсом K_{ot} і швидкістю V_{ot} . Наявність небезпеки зближення визначається співвідношенням величин прогнозованої дистанції найкоротшого зближення D_{min} суден і гранично допустимої дистанції

D_d зближення. Зближення суден небезпечне, якщо $\min D < D_d$. В іншому випадку зближення безпечне, тобто допустиме, що аналітично виражається наступним чином. Використовуємо раніше отриманий вираз для $D_{\min}$ і отримаємо:

$$D_{\min} = \Delta D \sin(\alpha - K_{ot}) \geq D_d, \quad (3.17)$$

де $\Delta = -1$, при $\sin(\alpha - K_{ot}) < 0$, в іншому випадку $\Delta = 1$.

Мінімальне допустиме значення дистанції найкоротшого зближення визначається рівністю, що випливає з (3.17):

$$\Delta D \sin(\alpha - K_{ot}) = D_d. \quad (3.18)$$

Отримане рівняння визначає межу між множинами небезпечних та допустимих ситуацій зближень суден і задане в просторі відносного руху. Перетворимо отримане рівняння (3.18) в простір істинного руху, записавши його у вигляді:

$$\sin(\alpha - K_{ot}) = \frac{D_d}{\Delta D},$$

звідки

$$\operatorname{tg} K_{ot} = \operatorname{tg}[\alpha - \arcsin(\frac{D_d}{\Delta D})].$$

Позначимо $\gamma = \alpha - \arcsin(\frac{D_d}{\Delta D})$ і, враховуючи, що відповідно до (3.2):

$$\operatorname{tg} K_{ot} = \frac{V_1 \sin K_1 - V_2 \sin K_2}{V_1 \cos K_1 - V_2 \cos K_2},$$

отримаємо:

$$V_1(\sin K_1 \cos \gamma - \cos K_1 \sin \gamma) = V_2(\sin K_2 \cos \gamma - \cos K_2 \sin \gamma). \quad (3.19)$$

Рівняння (3.19), при заданому значенні γ , яке визначається початковою відносною позицією суден, пов'язує значення параметрів руху суден K_1 , V_1 , K_2 та V_2 , при яких досягається межа в просторі істинного руху між множинами небезпечних та допустимих ситуацій зближень суден, тобто справедливою є рівність $\min D = D_d$. Тому, якщо в просторі істинного руху межу (3.19) проектувати на площині, осями яких є параметри руху різних суден, тобто з чотирьох параметрів руху суден зафіксувати два параметра P_a та P_b , а два, що залишилися, P_x та P_y розглядати, як перемінні величини, то за допомогою рівняння (3.19) можна отримати залежність між параметрами P_x та P_y :

$$P_y = f(\gamma, P_a, P_b, P_x), \quad (3.20)$$

яка представляє криву на площині $P_x \times P_y$, що є межею області Ω неприпустимих значень параметрів P_x та P_y . Для точок $(p_x, p_y) \in \Omega$ зближення суден небезпечне, якщо ж точки (p_x, p_y) знаходяться на межі області Ω або поза нею, то зближення безпечне і ситуація зближення допустима.

При вільній акваторії маневрування найбільш переважним є маневр розходження зміною курсу. Тому в якості змінних параметрів P_x та P_y вибираються курси суден, що зближаються, K_1 , K_2 , причому $P_x = K_1$ та $P_y = K_2$, а параметри V_1 та V_2 є незмінними. В цьому випадку вираз (3.20) описує межу області неприпустимих значень курсів елементарної групи суден, яку докладно розглянемо в наступному розділі.

В обмежених водах існують ситуації, в яких судна при небезпечному зближенні не можуть змінювати свій курс, тому попередити їхні зіткнення можливо тільки зміною швидкостей. У цьому випадку в якості змінних пара-

метрів вибираються швидкості суден, тобто $P_x = V_2$ та $P_y = V_1$, а незмінними є курси суден K_1 та K_2 . При такій постановці завдання формується область неприпустимих значень швидкостей елементарної групи суден, докладне дослідження якої є змістом чергової глави.

У разі необхідності використовується ще один тип стратегії розходження, при якому одне з суден змінює курс, зберігаючи постійною швидкість, а друге судно на сталому курсі може знижувати свою швидкість. У зазначеному випадку необхідно розглянути область неприпустимих значень курсів одного судна і швидкостей іншого судна, коли в якості змінних параметрів вибираються курс одного судна K_1 (K_2) і швидкість другого судна V_2 (V_1), тобто $P_x = V_2$ (V_1) та $P_y = K_1$ (K_2), а незмінними є параметри руху суден K_2 (K_1) та V_1 (V_2). У випадку домену кругової області значення γ в рівняннях (3.19) та (3.20) є постійною величиною, оскільки $D_d = \text{const}$.

3.5. Висновки за третім розділом

Глава присвячена математичному опису елементарної групи суден, що небезпечно зближуються. В ній показано, що основними аспектами попередження зіткнення елементарної групи суден є метод управління процесом розходження, спосіб оцінки небезпеки зближення і вибору маневру розходження і форма домену неприпустимих позицій.

Досліджено взаємозв'язок параметрів істинного і відносного руху суден елементарної групи та проведено його аналіз. Отримано аналітичні вирази прямого і зворотного відображень простору істинного руху в простір відносного руху.

Здійснено аналітичний опис ситуації небезпечного зближення суден елементарної групи, що дозволяє виявити появу ситуаційного збурення і оцінити його інтенсивність.

Отримано модель формалізації областей неприпустимих значень параметрів руху суден елементарної групи, як проекції що розділяє межі чотиривимірного простору істинного руху на двовірні площини параметрів руху різних суден групи. Показана можливість формування трьох типів областей: область неприпустимих значень курсів елементарної групи суден, область неприпустимих значень швидкостей елементарної групи суден, область неприпустимих значень курсів одного судна і швидкостей іншого судна.

Матеріали розділу опубліковано в роботах [1, 14, 17, 36, 38, 44, 47, 48, 57, 60].

РОЗДІЛ 4.

АНАЛІТИЧНІ МЕТОДИ ПОПЕРЕДЖЕННЯ ЗІТКНЕННЯ СУДЕН ДЛЯ СТАНДАРТНОГО ДОМЕНУ

В даний час традиційно в задачах визначення маневру розходження використовується домен у вигляді кола, в центрі якого знаходиться судно. Тому під стандартною мається на увазі аналітична система попередження зіткнення суден, домен якої має форму кола.

У попередньому розділі було показано, що основними трьома типами області неприпустимих значень параметрів руху елементарної групи суден, за допомогою яких проводиться оцінка небезпеки ситуації зближення і вибір маневру розходження при його зовнішньому управлінні, є наступні: області неприпустимих значень курсів суден елементарної групи, область неприпустимих значень швидкостей елементарної групи суден і область неприпустимих значень курсів одного судна і швидкостей іншого судна елементарної групи.

4.1. Формування і застосування області неприпустимих значень курсів елементарної групи суден

Як вказувалося в попередньому розділі, рівнянням межі між підмножинами небезпечних та допустимих ситуацій є рівність $D_{\min}(K_1, K_2) = D_d$. Підставляємо вираз для $D_{\min}$ (3.12):

$$\Delta_n D \sin(K_{ot} - \alpha) = D_d,$$

звідки

$$K_{ot} - \alpha = \arcsin \frac{D_d}{\Delta_n D}.$$

З останнього рівняння можна записати:

$$\operatorname{tg} K_{\text{от}} = \operatorname{tg} [\alpha + \arcsin \frac{D_d}{\Delta_n D}],$$

або

$$\operatorname{tg} K_{\text{от}} = \operatorname{tg} \gamma,$$

$$\text{де } \gamma = \alpha + \arcsin \frac{D_d}{\Delta_n D}.$$

З урахуванням виразу (3.2) попереднього розділу справедливою є рівність:

$$\frac{V_1 \sin K_1 - V_2 \sin K_2}{V_1 \cos K_1 - V_2 \cos K_2} = \operatorname{tg} \gamma.$$

Перетворимо останній вираз:

$$V_1 (\sin K_1 - \operatorname{tg} \gamma \cos K_1) = V_2 (\sin K_2 - \operatorname{tg} \gamma \cos K_2).$$

Перемножимо обидві частини рівняння на величину $\frac{\cos \gamma}{V_1}$ і отримаємо:

$$(\sin K_1 \cos \gamma - \cos K_1 \sin \gamma) = \rho (\sin K_2 \cos \gamma - \cos K_2 \sin \gamma),$$

$$\text{де } \rho = \frac{V_2}{V_1}.$$

Отримане рівняння являє собою аналітичний вираз межі області неприпустимих значень курсів S_{Dij} , що обгороджує неприпустимі поєднання значень пар відповідних курсів K_1 та K_2 . Звертаємо увагу, що вираз в круглих дужках лівої і правої частини рівняння являє собою синус різниці двох аргументів, тобто:

$$\sin(K_1 - \gamma) = \rho [\sin(K_2 - \gamma)],$$

причому рівняння має два кореня, і справедливі наступні аналітичні залежності:

$$K_1 - \gamma = \arcsin\{\rho[\sin(K_2 - \gamma)]\},$$

$$K_1 - \gamma = \pi - \arcsin\{\rho[\sin(K_2 - \gamma)]\}.$$

Як було показано в попередньому розділі, перший з двох коренів рівняння відповідає ситуації зближення суден на зустрічних курсах, а другий – на попутних. Оскільки небезпека зіткнення виникає тільки при зближенні суден на зустрічних курсах, то рівняння меж небезпечних областей визначається виразом:

$$K_1 - \gamma = \arcsin\{\rho[\sin(K_2 - \gamma)]\},$$

або

$$K_1 = \gamma + \arcsin\{\rho[\sin(K_2 - \gamma)]\}. \quad (4.1)$$

У разі, коли $V_2 > V_1$, тобто $\rho > 1$, у виразі (4.1) має дотримуватися умови $\rho[\sin(K_2 - \gamma)] \leq 1$, або $\sin(K_2 - \gamma) \leq \rho^{-1}$. Отже, граничні значення курсу K_2 дорівнюють:

$$K_{21} = \gamma + \arcsin(\rho^{-1});$$

$$K_{22} = \gamma + \pi - \arcsin(\rho^{-1});$$

$$K_{23} = \gamma + \pi + \arcsin(\rho^{-1});$$

$$K_{24} = \gamma + 2\pi - \arcsin(\rho^{-1}),$$

а область значень змінної K_2 визначається:

$$K_2 \in \{S_1 \cup S_2\}.$$

В останньому виразі області S_1 та S_2 можливих значень курсу K_2 аналітично визначаються наступним чином:

$$S_1 = [\gamma + 2\pi - \arcsin(\rho^{-1}), \gamma + \arcsin(\rho^{-1})],$$

$$S_2 = [\gamma + \pi - \arcsin(\rho^{-1}), \gamma + \pi + \arcsin(\rho^{-1})].$$

Області S_1 та S_2 можливих значень курсу K_2 , що задовольняють нерівності $\sin(K_2 - \gamma) \leq \rho^{-1}$, представлено на рис. 4.1, з урахуванням співвідношення $\rho^{-1} = \frac{V_1}{V_2}$.

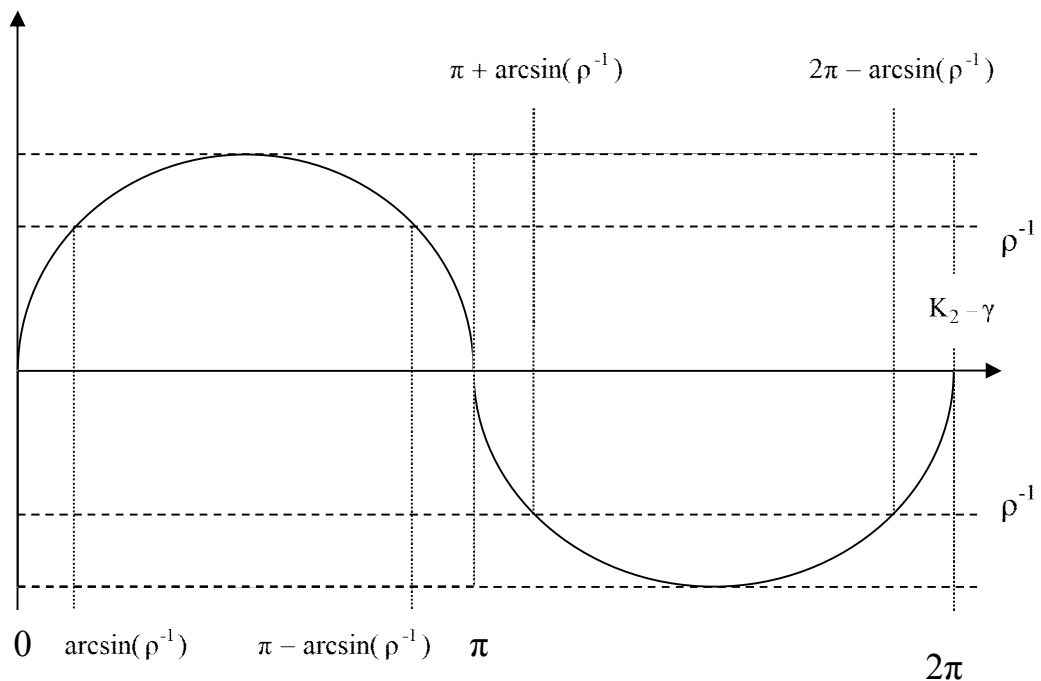


Рис. 4.1. Визначення областей S_1 та S_2

Межі небезпечної області курсів S_{Dij} для параметрів ситуації зближення $V_1 = 10$ вуз., $V_2 = 20$ вуз., $D = 3$ милі, $\alpha = 0^\circ$ та $D_d = 1$ миля показані на рис. 4.2. Звертаємо увагу на ту обставину, що область неприпустимих значень курсів S_{Dij} належить області зближення суден.

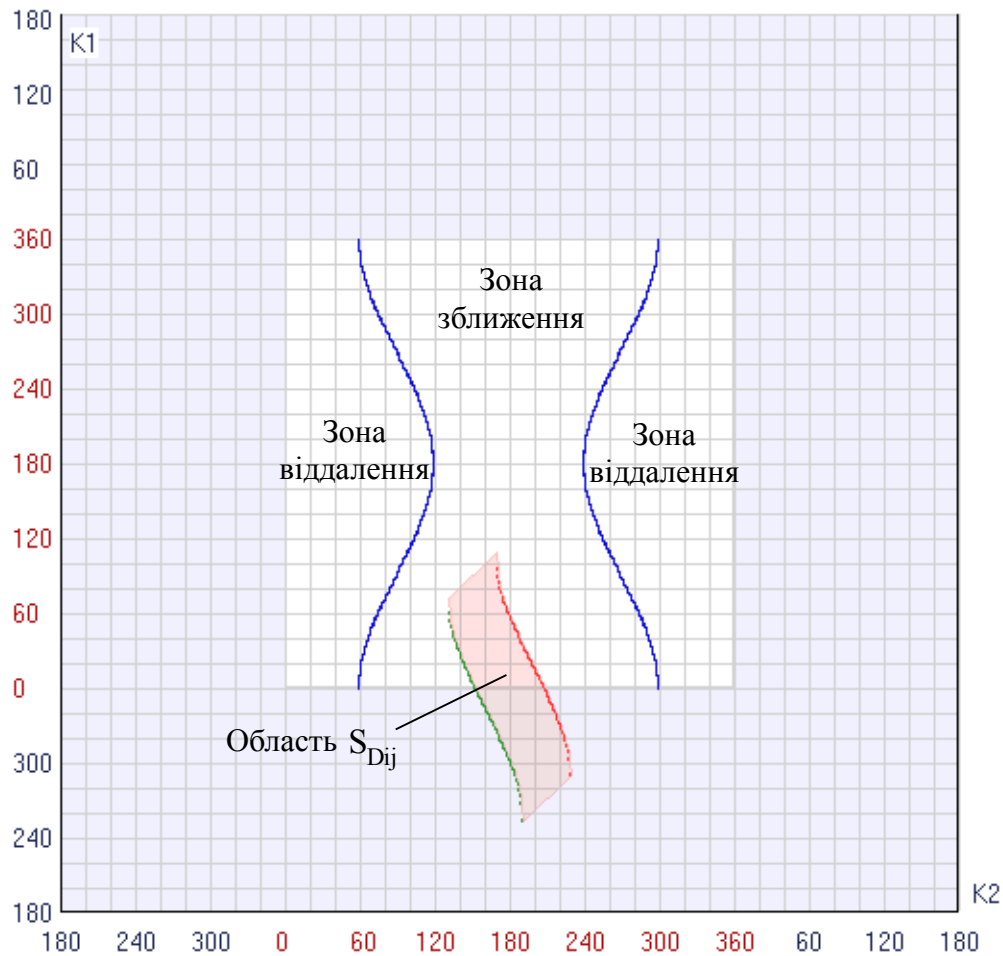


Рис. 4.2. Область S_{Dij} при $V_2 > V_1$ та $D = 3$

При скороченні дистанції між суднами, але при $D > D_d$, область неприпустимих значень курсів S_{Dij} збільшується, як показано на рис. 4.3 для $D = 1,5$ милі. Слід звернути увагу на те, що межі області S_{Dij} подібні межам, що розділяють підмножину ситуацій зближення суден. Особливо це помітно на рис. 4.3.

В разі $V_1 = V_2$ впливає:

$$K_1 - \gamma = \arcsin\{\sin(K_2 - \gamma)\}$$

та

$$K_1 - \gamma = \pi - \arcsin\{\sin(K_2 - \gamma)\},$$

або

$$K_1 - \gamma = K_2 - \gamma \text{ та } K_1 - \gamma = \pi - K_2 + \gamma,$$

тобто

$$K_1 = K_2 \text{ та } K_1 = \pi + 2\gamma - K_2.$$

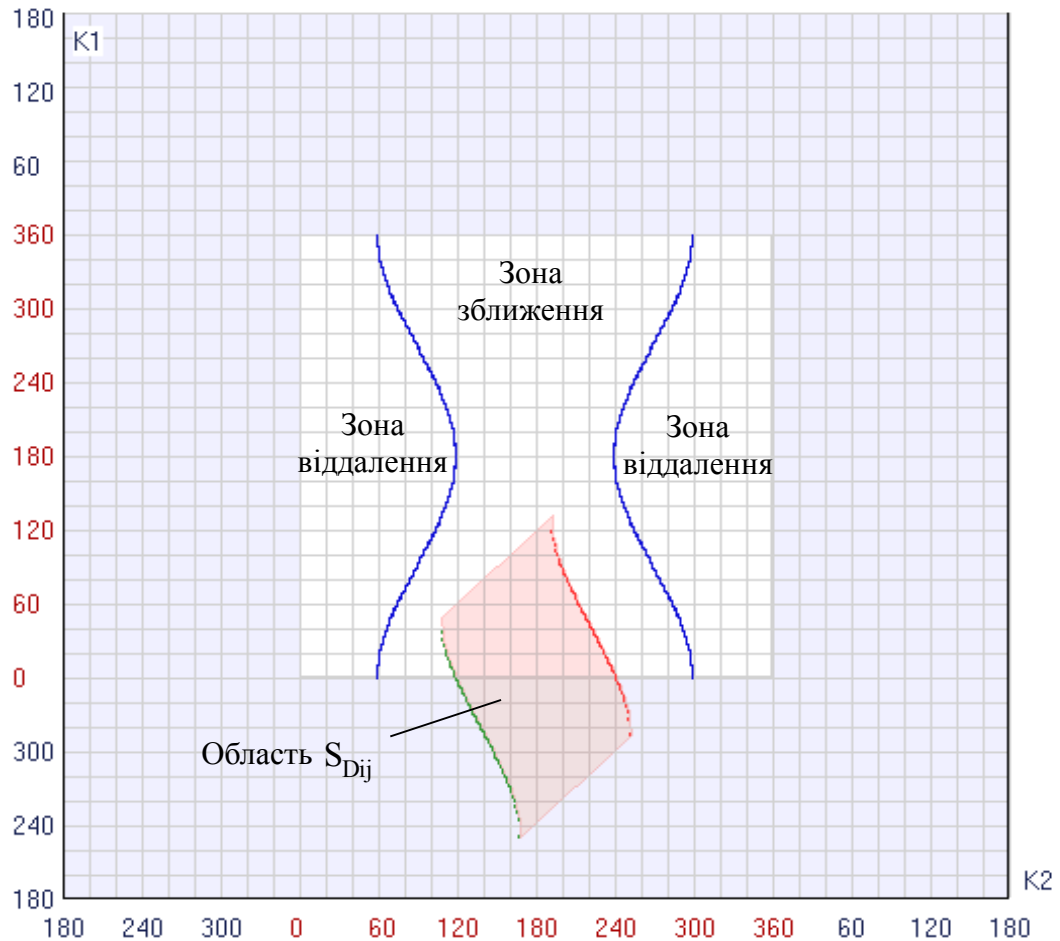


Рис. 4.3. Область S_{Dij} при $V_2 > V_1$ та $D = 1,5$ милі

Умові зближення на зустрічних курсах відповідає залежність $K_1 = \pi + 2\gamma - K_2$, яку показано на рис. 4.4.

Очевидно, в разі $V_2 = V_1$ (рис. 4.5) межі області небезпечних курсів S_{Dij} є відрізками прямих ліній, які паралельні межам області зближення суден. На рис. 4.5 показана D_{min} область S_{Dij} при $V_2 = V_1$ та $D = 3$.

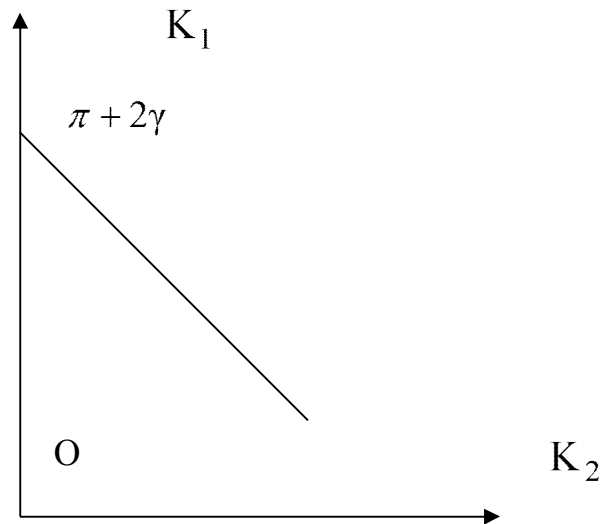


Рис. 4.4. Залежність курсу суден K_1 від K_2 при $V_2 = V_1$

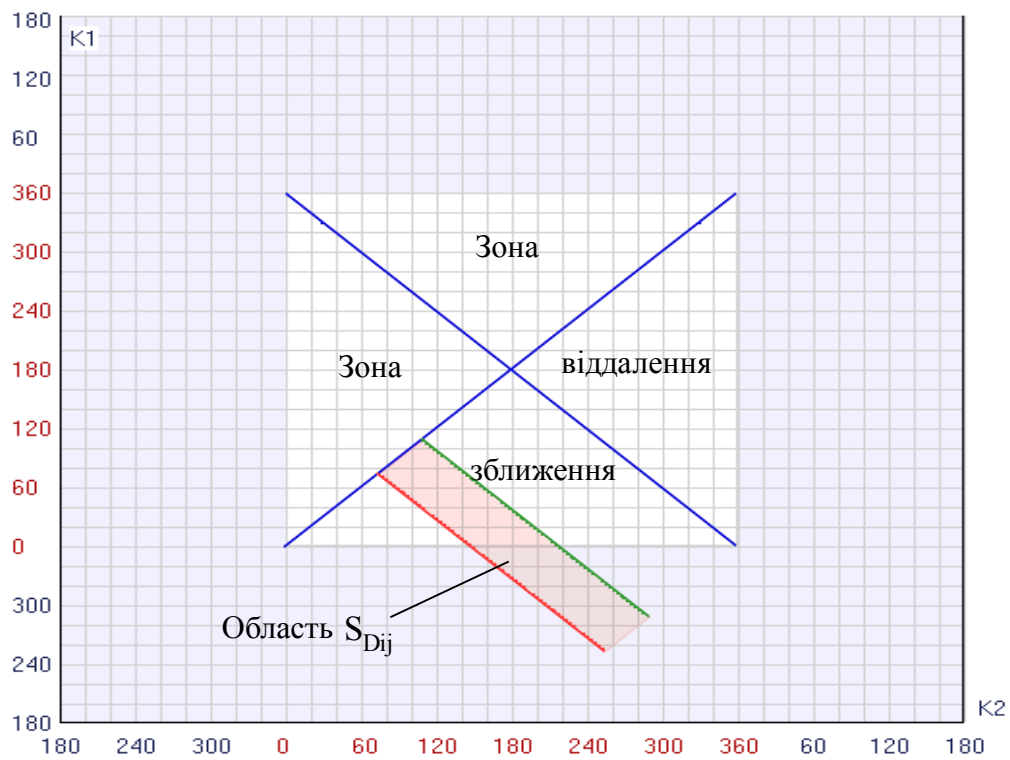


Рис. 4.5. Область S_{Dij} при $V_2 = V_1$ та $D=3$

Якщо $V_2 < V_1$, тобто $\rho < 1$, то залежність між курсами суден K_1 та K_2 для випадку зближення виражається в таким чином:

$$K_1 = \gamma + \arcsin \{ \rho [\sin(K_2 - \gamma)] \}.$$

Оскільки $\rho < 1$, то курс K_2 приймає всі значення від 0 до 2π .

На рис. 4.6. наведена область неприпустимих значень курсів S_{Dij} курсів K_1 та K_2 для $V_1=20$ вуз., $V_2=15$ вуз.

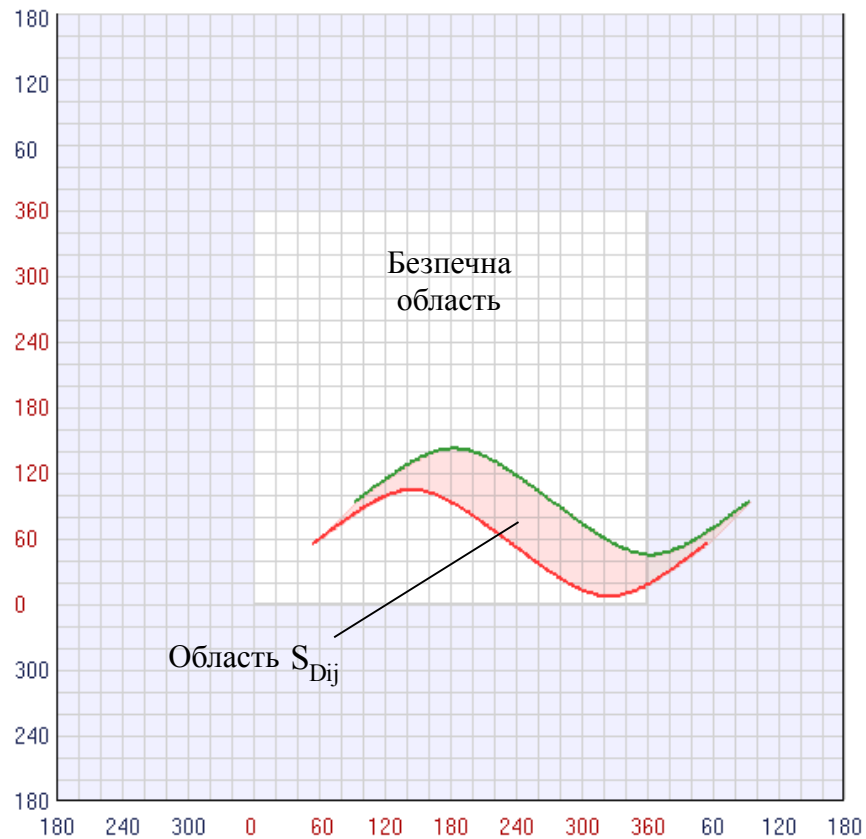


Рис. 4.6. Небезпечна область S_{Dij} курсів K_1 та K_2 при $V_2 < V_1$

Таким чином, знаючи область неприпустимих значень курсів S_{Dij} двох суден можна вибрати такі безпечні курси ухилення, що забезпечують розходження на відстані, яка більше величини гранично допустимої дистанції.

Звертаємо увагу на те, що задача визначення параметрів оптимального маневру розходження в першу чергу вимагає, щоб точки, відповідні парним курсам (K_1, K_2) знаходилися поза областю неприпустимих значень курсів S_{Dij} , що є умовою належності точки (K_1, K_2) до області допустимих значень:

$$(K_1, K_2) \notin S_{Dij}.$$

Для безпечного розходження суден, як зазначалося вище, необхідно змінити курси суден на величини ΔK_1 , ΔK_2 і вивести точку $(K_1 + \Delta K_1, K_2 + \Delta K_2)$ з області неприпустимих значень курсів S_{Dij} :

$$(K_1 + \Delta K_1, K_2 + \Delta K_2) \notin S_{Dij},$$

причому зміна одного з курсів може дорівнювати нулю. Для оптимальності маневру розходження при дотриманні останньої умови необхідно, щоб приріст курсів ΔK_1 та ΔK_2 були мінімальними і задовольняли співвідношенню

$$(\Delta K_1^2 + \Delta K_2^2) \rightarrow \min.$$

Така геометрична наочна інтерпретація задачі вибору оптимальних курсів для розходження дозволяє запропонувати графічний спосіб комп'ютерного моделювання для вирішення поставленого завдання, який полягає в наступному. Для пари суден, що небезпечно зближуються, на екрані виводиться зображення розширеної площини можливих поєднань курсів $K_1 \times K_2$, причому вона має розміри $720^\circ \times 720^\circ$. Використання розширеної площини необхідно для коректного відображення небезпечної області, межі якої розраховуються за допомогою рівняння:

$$(\sin K_1 \cos \gamma - \cos K_1 \sin \gamma) = \rho (\sin K_2 \cos \gamma - \cos K_2 \sin \gamma),$$

де $\rho = \frac{V_2}{V_1}$ та $\gamma = \alpha - \arcsin(\frac{D_d}{\Delta D})$. З урахуванням величини ρ на розширеній

площині відображується область неприпустимих значень курсів (рис. 4.7).

Якщо точка (K_1, K_2) знаходиться поза небезпечною областю, то є справедливою нерівність $D_{\min} > D_d$, що відповідає безпечному розходженню суден.

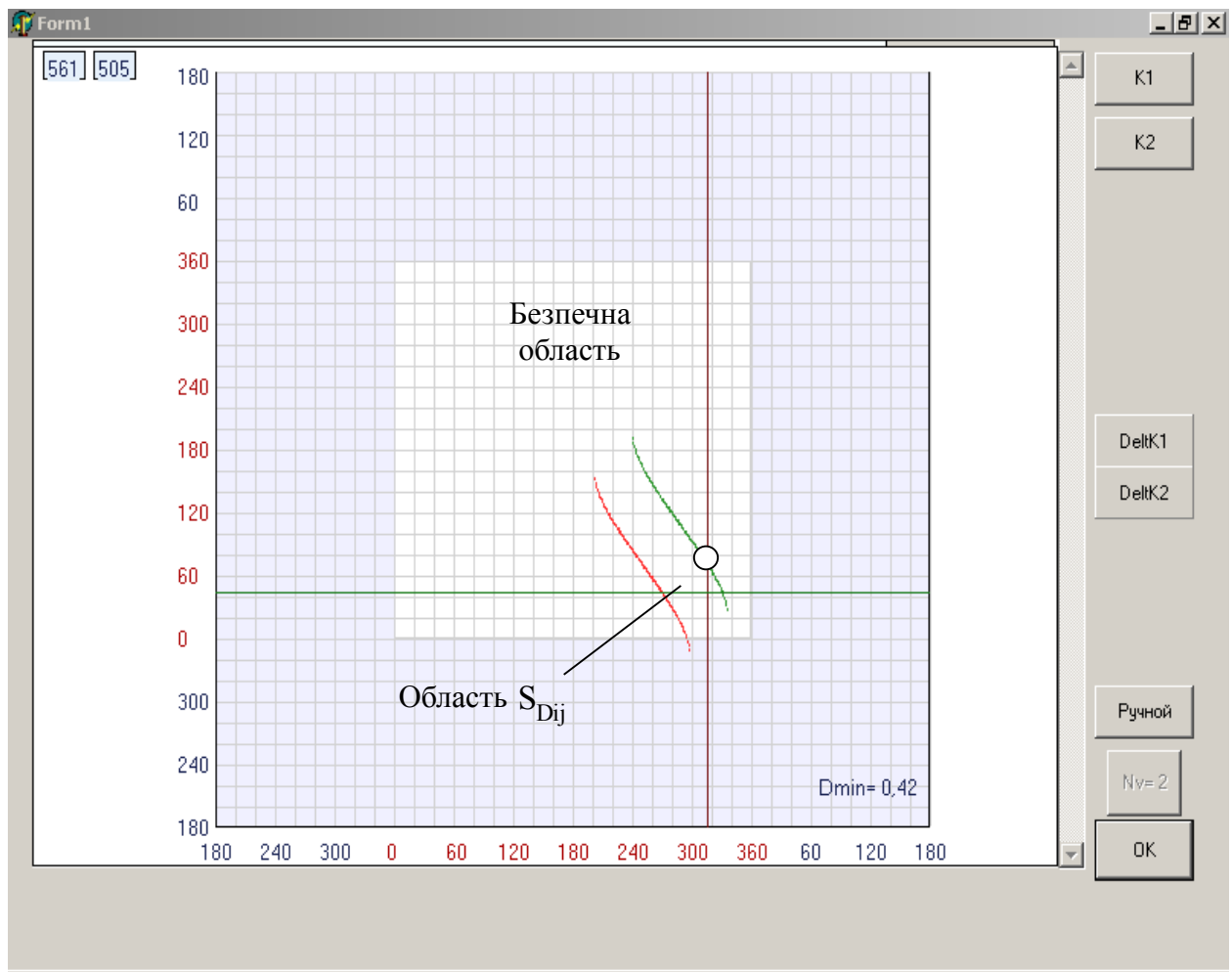


Рис. 4.7. Відображення небезпечної області курсів двох суден S_{Dij}

На рис. 4.7 показана небезпечна область S_{Dij} для наступних параметрів: $\alpha=90^\circ$, $D=3.0$ милі, $D_d=1,0$ милі, $V_1=15$ вузлів, $V_2=20$ вузлів.

Для початкових курсів $K_{n1}=45$, та $K_{n2}=315$ початкова точка знаходиться в небезпечній області курсів (на рис. 4.7 курс K_2 відкладається по осі ординат і відображається горизонтальною лінією, а курс K_1 відкладається по осі абсцис і відображається вертикальною лінією). Для даної точки $D_{\min} = 0,42$ милі і необхідно змінювати положення точки (K_1, K_2) , виводячи її з небезпечної області S_{Dij} , як показано на рис. 4.8.

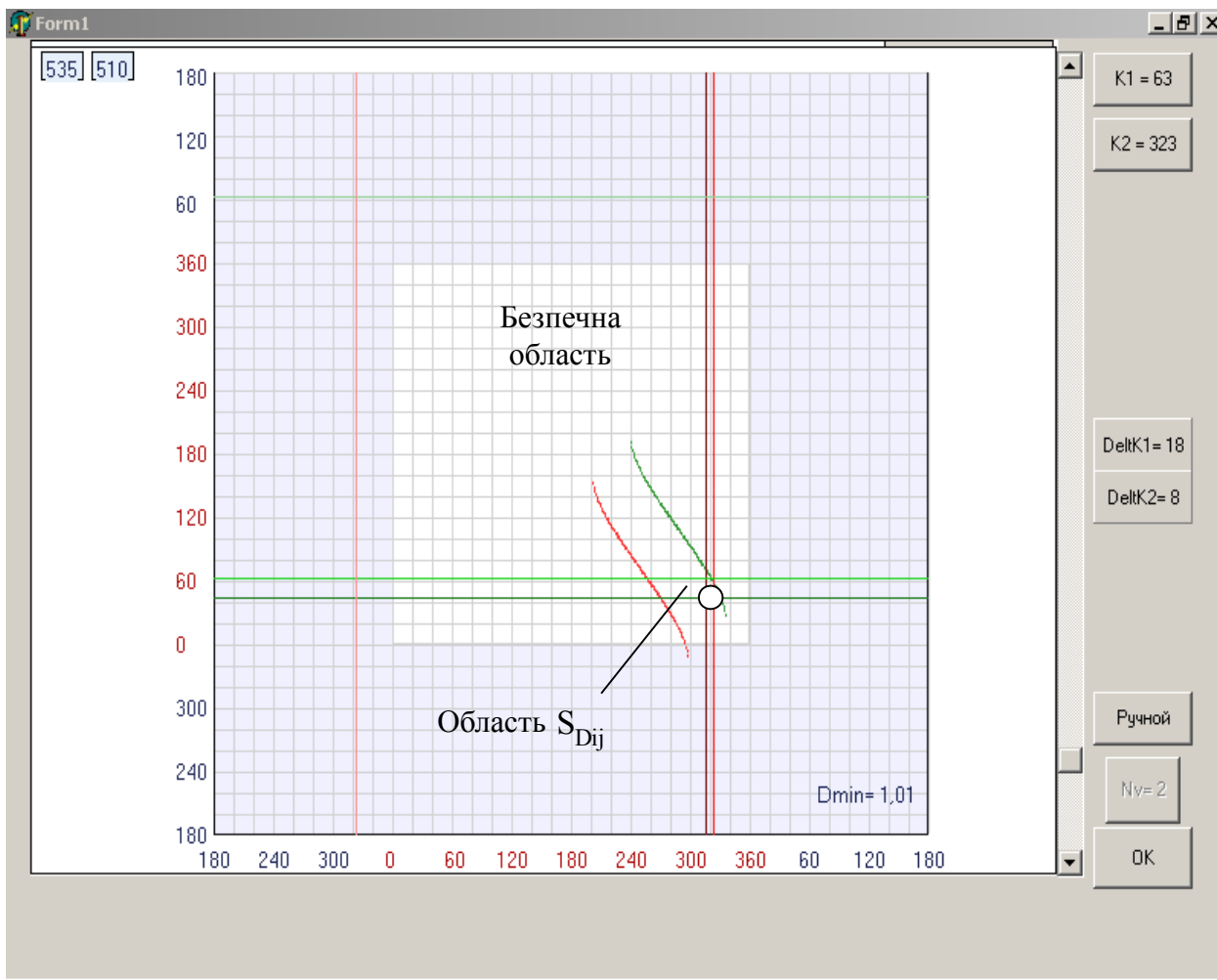


Рис. 4.8. Визначення оптимальних значень курсів K_1 та K_2

З рис. 4.8 видно, що оптимальні значення курсів дорівнюють $K_1 = 63^\circ$ та $K_2 = 323^\circ$, при цьому $\Delta K_1 = 18^\circ$ та $\Delta K_2 = 8^\circ$. При зазначених курсах суден дистанція найкоротшого зближення $D_{\min} = 1,01$ милі.

4.2. Розрахунок меж області неприпустимих значень швидкостей елементарної групи суден і вибір з її допомогою маневру розходження

У ситуації, коли два судна, що небезпечно зближуються, не можуть змінювати свої курси, наприклад через наявність навігаційні небезпеки, то попередження зіткнення можливе тільки зміною їх швидкостей. В цьому випадку

при зовнішньому управлінні рухом суден - станцією управління рухом суден, безліч станів системи пари суден доцільно представити областю небезпечних швидкостей, яка аналогічна вище розглянутій області небезпечних курсів, де кожній точці (V_1, V_2) парних швидкостей суден відповідає дистанція найкоротшого зближення. Межа небезпечної області швидкостей, де кожна точка відповідає дистанції найкоротшого зближення $D_{\min}$, рівній гранично-допустимій дистанції D_d , виражена формулою (3.12):

$$D_{\min} = \Delta D \sin(\alpha - K_{ot}) = D_d,$$

З отриманого рівняння випливає:

$$\alpha - K_{ot} = \arcsin\left(\frac{D_d}{\Delta D}\right),$$

звідки отримаємо

$$K_{ot} = \alpha - \arcsin\left(\frac{D_d}{\Delta D}\right).$$

Отже, можна записати:

$$\operatorname{tg} K_{ot} = \operatorname{tg}[\alpha - \arcsin(\frac{D_d}{\Delta D})]. \quad (4.2)$$

Враховуючи, що

$$\operatorname{tg} K_{ot} = \frac{V_1 \sin K_1 - V_2 \sin K_2}{V_1 \cos K_1 - V_2 \cos K_2},$$

рівняння (4.2) приймає вигляд:

$$\frac{V_1 \sin K_1 - V_2 \sin K_2}{V_1 \cos K_1 - V_2 \cos K_2} = \frac{\sin \gamma}{\cos \gamma}, \quad (4.3)$$

де $\gamma = \alpha \pm \arcsin\left(\frac{D_d}{\Delta D}\right)$.

З рівняння (4.3) отримаємо:

$$(V_1 \sin K_1 - V_2 \sin K_2) \cos \gamma = (V_1 \cos K_1 - V_2 \cos K_2) \sin \gamma,$$

або

$$V_1 (\sin K_1 \cos \gamma - \cos K_1 \sin \gamma) = V_2 (\sin K_2 \cos \gamma - \cos K_2 \sin \gamma).$$

Останній вираз дає можливість записати рівняння для верхньої межі небезпечної області швидкостей:

$$V_1^* = V_2 \frac{\sin(K_2 - \gamma^*)}{\sin(K_1 - \gamma^*)}, \quad (4.4)$$

де $\gamma^* = \alpha - \arcsin D_d / D$.

Нижня межа виражається в такий спосіб:

$$V_{1*} = V_2 \frac{\sin(K_2 - \gamma_*)}{\sin(K_1 - \gamma_*)}, \quad (4.5)$$

де, $\gamma_* = \alpha + \arcsin D_d / D$.

Очевидно, при постійних значеннях курсів K_1 , K_2 і параметрів γ^* , γ_* межі небезпечної області швидкостей є лінійними. На рис. 4.9 показана область неприпустимих швидкостей для пари суден, що небезпечно зближуються та курси яких є постійними. На приклад, запропонована ситуація небезпечного зближення суден з параметрами: $\alpha = 90^\circ$, $D = 3,0$ милі, $D_d = 1,0$ милі, $K_1 = 45^\circ$, $K_2 = 315^\circ$, і початковими швидкостями $V_1 = 15$ вузлів та $V_2 = 15$ вузлів. В даному випадку $\gamma^* = 70,5^\circ$ та $\gamma_* = 109,5^\circ$, а вирази для верхньої

$Gr^*(V_1, V_2)$ і нижньої $Gr_*(V_1, V_2)$ меж:

$$V_1^* = 2,097V_2 \text{ та } V_{1*} = 0,477V_2.$$

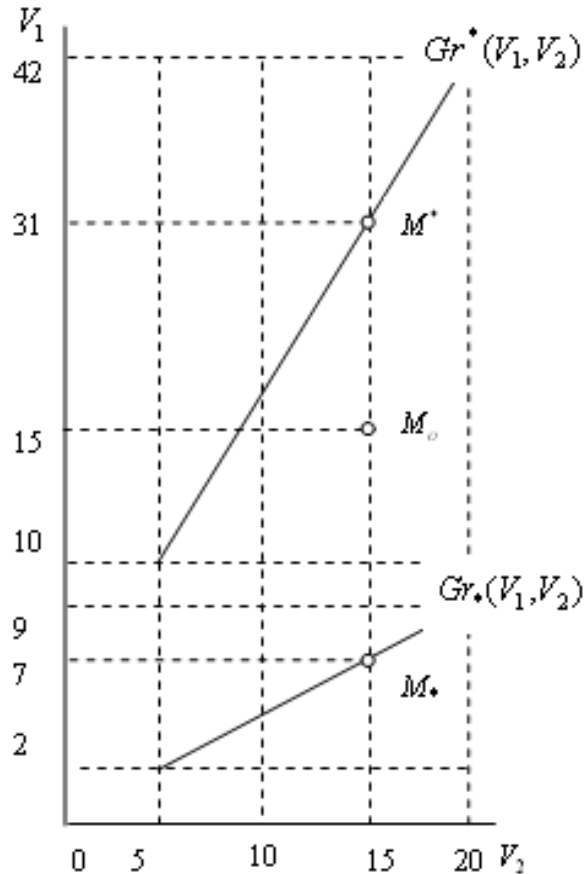


Рис. 4.9. Область неприпустимих швидкостей

Як впливає з наведеного рисунка, точка з початковими швидкостями M_o належить області неприпустимих швидкостей і зближення суден небезпечне. Якщо судно, що має швидкість V_2 рухається з незмінними параметрами, а судно зі швидкістю V_1 буде маневрувати зміною швидкості, то безпечне розходження на дистанції $D_d=1,0$ милі можливо при збільшенні швидкості V_1 до значення 31,5 вузла (точка M^*) або її зменшенні до значення 7,2 вузла (точка M_*). Зазначені точки знаходяться на верхній $Gr^*(V_1, V_2)$ і ниж-

ній $Gr_*(V_1, V_2)$ межах області небезпечних швидкостей.

Якщо можлива практично миттєва зміна швидкості V_1 до зазначених меж, то значення дистанції D і пеленга α постійні і судна розходяться на заданій гранично допустимій дистанції. Однак через інерційність судна для зміни швидкості судна V_1 до необхідних значень потрібний інтервал часу [84]:

$$\tau = \frac{m}{2kV_{y1}} \ln \left| \frac{2V_{y1}^2 - 2V_1V_{y1} - 0,1(V_{y1} - V_1)}{0,1(V_{y1} + V_1)} \right|,$$

де m – маса судна з приєднаними масами; k – гідродинамічний коефіцієнт опору; V_{y1} – кінцева швидкість, судна що маневрує (V_{1*} або V_1^*).

У Додатку А отримані умови існування множини безпечних маневрів розходження суден зміною швидкостей з урахуванням їх інерційності

Показано, що при проходженні суден на контркурсах і паралельними курсами зміна швидкостей суден не впливає на величину відносного курсу. Тому в таких ситуаціях маневр розходження суден зміною швидкостей неможливий, тобто множина безпечних маневрів розходження є порожньою.

У Додатку А також отримано, що при рівності поточних швидкостей суден ($\Delta V = 0$) величина відносного курсу $K_{отн}$ також не змінюється. Тому в разі рівності початкових швидкостей суден при їх однаковій зміні маневр розходження суден зміною швидкостей стає неможливий.

Область неприпустимих швидкостей пари суден відповідно (4.4) і (4.5) має межі:

$$V_1^* = k^* V_2, \quad V_{1*} = k_* V_2,$$

$$\text{де } k^* = \frac{\sin(K_2 - \gamma^*)}{\sin(K_1 - \gamma^*)} \text{ та } k_* = \frac{\sin(K_2 - \gamma_*)}{\sin(K_1 - \gamma_*)}.$$

Очевидно, можливе існування множини безпечних маневрів розходження існує за умови:

$$\infty > k^* > 0, \infty > k_* > 0 \text{ та } k^* > k_*. \quad (4.6)$$

В протилежному випадку множина безпечних маневрів розходження є порожньою. В цьому разі область небезпечних швидкостей має вигляд, показаний на рис. 4.10. В цьому прикладі параметри ситуації зближення приймають таке значення:

$$\alpha_0 = 45^\circ, D_0 = 3 \text{ милі}, D_d = 1 \text{ миля}, K_1 = 90^\circ, K_2 = 180^\circ.$$

При початкових швидкостях $V_1 = 18$ вуз. та $V_2 = 21$ вуз. дистанція найкоротшого зближення $D_{\min} = 0,23$ милі.

Якщо умова (4.6) справедлива, то врахування інерційних характеристик суден при виборі безпечного маневру розходження зміною їх швидкостей полягає в наступному.

Пара безпечних швидкостей V_{1y} та V_{2y} визначається за допомогою області небезпечних швидкостей. Для досягнення необхідних швидкостей розходження V_{1y} та V_{2y} через інерційність суден потрібен час τ_{1y} та τ_{2y} .

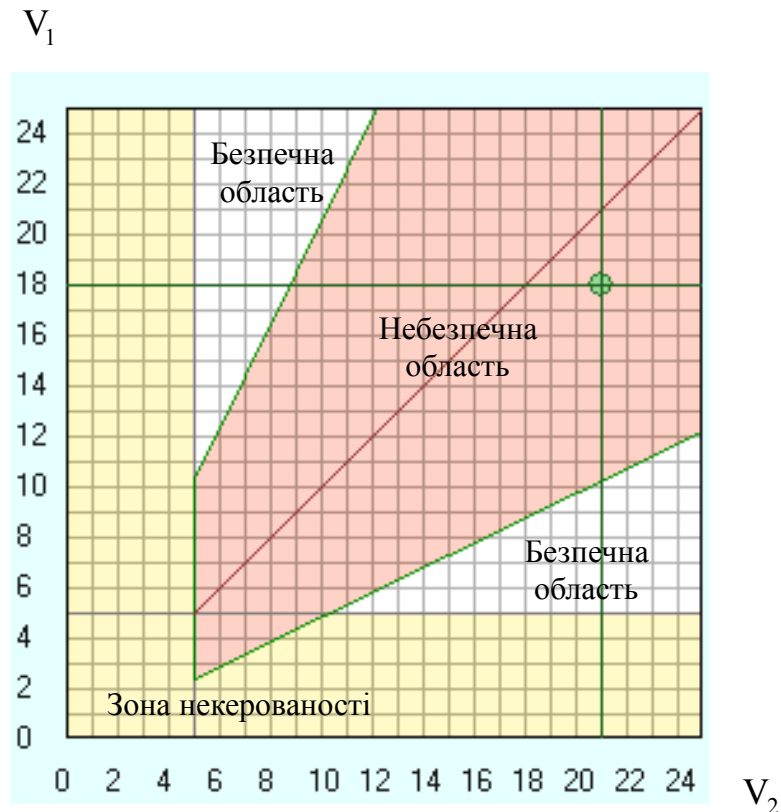


Рис. 4.10. Область небезпечних швидкостей суден

Загалом значення інтервалів часу не є рівними між собою. Відповідно тривалість перехідного процесу t_p від початку зміни швидкостей суден до необхідних значень V_{1y} та V_{2y} визначається більшим з інтервалів τ_{1y} та τ_{2y} , тобто $t_p = \max(\tau_{1y}, \tau_{2y})$. Множина безпечних маневрів розходження існує, що в цей момент часу при незмінних курсах суден K_1 та K_2 , а також постійних швидкостях V_{1y} та V_{2y} дистанція найкоротшого зближення дорівнює або більше гранично допустимої дистанції D_d .

Значення швидкостей V_{1y} та V_{2y} є меншими ніж їх початкові величини V_1 та V_2 , зрозуміло, що маневр розходження суден зміною швидкостей виконується їх гальмуванням. Тоді судна зі зниженими швидкостями слідує до моменту часу найкоротшого зближення і потім збільшують швидкості до початкових значень.

Наприклад, ситуація небезпечного зближення суден для початкового мо-

менту часу $t_0 = 0$ характеризується пеленгом α_0 і дистанцією D_0 . Так як, пеленг α_0 задається з першого судна на друге, то для першого судна приймаємо початкові координати $X_{10} = 0$ та $Y_{10} = 0$. Відповідно, початкові координати другого судна мають значення $X_{20} = D_0 \sin \alpha_0$ та $Y_{20} = D_0 \cos \alpha_0$.

З плином часу координати суден X_{1t} , Y_{1t} , X_{2t} та Y_{2t} , а також поточні значення дистанції D_t і пеленга α_t будуть змінюватися. Судно, перехідний період якого більше і дорівнює тривалості загального перехідного процесу t_p , позначимо через c_{mx} . Відповідно, судно з меншим перехідним періодом позначимо c_{mn} . У випадку, коли час початку маневру розходження t_n перевищує початковий момент часу t_0 , то судна протягом перехідного процесу t_p проходять дистанції, розраховані за формулами:

$$L_{mx} = V_{mx} t_n + S_{mx},$$

$$L_{mn} = V_{mn} t_n + S_{mn} + V_{mny} (t_p - \tau_{mn}),$$

де S_{mx} та S_{mn} – відстані, які проходять відповідно судна c_{mx} та c_{mn} за час перехідного процесу зміни швидкостей τ_{mx} та τ_{mn} .

До моменту закінчення загального перехідного процесу t_p судові координати X_{mxp} , Y_{mxp} , X_{mnp} та Y_{mnp} будуть визначаються наступними виразами:

$$X_{mxp} = L_{mx} \sin K_{mx} = (V_{mx} t_n + S_{mx}) \sin K_{mx};$$

$$Y_{mxp} = L_{mx} \cos K_{mx} = (V_{mx} t_n + S_{mx}) \cos K_{mx};$$

$$X_{mnp} = L_{mn} \sin K_{mn} = [V_{mn} t_n + S_{mn} + V_{mny} (t_p - \tau_{mn})] \sin K_{mn};$$

$$Y_{mnp} = L_{mn} \cos K_{mn} = [V_{mn} t_n + S_{mn} + V_{mny} (t_p - \tau_{mn})] \cos K_{mn}.$$

Значення пеленга α_p і дистанції D_p на момент часу t_p :

$$D_p = \sqrt{(X_{mxp} - X_{mnp})^2 + (Y_{mxp} - Y_{mnp})^2},$$

$$\alpha_p = \arcsin \frac{X_{mxp} - X_{mnp}}{D_p},$$

причому чверть, в якій знаходиться пеленг α_p , визначається знаками виразів $(X_{mxp} - X_{mnp})$ та $(Y_{mxp} - Y_{mnp})$.

В момент часу t_p параметри руху обох суден стають незмінними, як і відносний курс $K_{отр}$. А дистанція найкоротшого зближення суден D_{min} розраховується за формулою:

$$D_{min} = \Delta_p D_p \sin(K_{отр} - \alpha_p), \quad (4.6)$$

де $\Delta_p = \text{sign}[\sin(K_{отр} - \alpha_p)]$.

Якщо отримане значення D_{min} дорівнює або більше величини D_d , то існує множина допустимих маневрів розходження за допомогою обраних швидкостей V_{1y} та V_{2y} . В іншому випадку слід вибрати іншу пару швидкостей V_{1y} та V_{2y} , які не належать області небезпечних швидкостей, і повторити перевірку існування множини допустимих маневрів.

Для реалізації запропонованого алгоритму необхідно мати вирази тривалості перехідних процесів τ_{1y} та τ_{2y} обох суден, а також відстаней S_1 та S_2 , які проходять судна за відповідні інтервали часу. Необхідно враховувати, що зниження швидкостей суден можливо виконано як активним, так і пасивним гальмуванням. Тому в Додатку А.2 отримані залежності для активного гальмування:

$$\tau_a = \frac{m}{\mu V_{yp}} \left[\arctg \frac{V_o}{V_{yp}} - \arctg \frac{V_y}{V_{yp}} \right],$$

$$S_a = \frac{m}{2\mu} \ln \left| \frac{V_o^2 + V_{yp}^2}{V_y^2 + V_{yp}^2} \right|,$$

$$V_a = V_{yp} \operatorname{tg} \left(\operatorname{arctg} \frac{V_o}{V_{yp}} - \frac{\mu V_{yp}}{m} t \right).$$

У разі пасивного гальмування:

$$\tau_p = \frac{m}{\mu} \left(\frac{1}{V_y} - \frac{1}{V_o} \right),$$

$$S_p = \frac{m}{2\mu} \ln \left| \frac{V_o^2}{V_y^2} \right|,$$

$$V_p = \frac{V_o}{1 + \frac{V_o \mu}{m} t}.$$

При будь-якому з варіантів маневру розходження зниженням швидкості суден вихідними є початкові швидкості руху суден V_1 , V_2 та вибрані безпечні швидкості V_{1y} , V_{2y} . Маневри розходження будуть відрізнятися значенням моменту часу початку маневру t_n . При нерівності $D_{\min} \geq D_d$ значення t_n буде змінюється від 0 до значення t_n^* , при якому $D_{\min} = D_d$, тобто $t_n \in [0, t_n^*]$.

За змістом розв'язуваної задачі оптимальним маневром розходження є такий, при виконанні якого досягається мінімум втрати ходового часу суден Δt_{mv} , викликаного даним маневром. У Додатку А.3 розглянуто вибір оптимального маневру розходження зниженням швидкостей аналітичним способом. При вихідних швидкостях руху суден V_1 , V_2 , і вибраних безпечних швидкостях V_{1y} , V_{2y} розраховується момент часу t_n^* початку гальмування, загальний для обох суден, при якому $D_{\min} = D_d$ і втрати ходового часу суден Δt_{mv} , пов'

язані з виконанням маневру розходження, є мінімальними.

У Додатку А.3 отримано формулу для розрахунку момент часу t_n^* для оптимального маневру:

$$t_n^* = \frac{\Delta_p D_d - S_{mx} \sin(K_{otp} - K_{mx}) - [S_{mn} + V_{mny}(t_p - \tau_{mn})] \sin(K_{otp} - K_{mn})}{V_{mx} \sin(K_{otp} - K_{mx}) - V_{mn} \sin(K_{otp} - K_{mn})}.$$

Практично значення t_n^* доцільно розраховувати за наступним алгоритмом. Вихідною є вираз для визначення D_{min} :

$$D_{min} = \text{Abs}[D_p \sin(K_{otp} - \alpha_p)]. \quad (4.7)$$

Оскільки по завершенню перехідного періоду при $t_n = 0$ справедливою є нерівність $D_{min} > D_d$ і відносний курс K_{otp} є постійним, то зі зростанням t_n значення D_{min} зменшується та змінюються величини пеленга α_p і дистанція D_p . Тому для кожного значення $t_n > 0$ слід розрахувати величини α_p та D_p , за допомогою яких за формулою (4.7) визначається величина D_{min} . Отримане значення D_{min} порівнюють з величиною гранично допустимої дистанції D_d . Процес розрахунку є циклічним до тих пір, поки не досягається рівність $D_{min} = D_d$, при цьому $t_n = t_n^*$.

Пеленг $\alpha_p(t_n)$ і дистанція $D_p(t_n)$ залежать від моменту часу початку маневру t_n і визначаються виразами:

$$\alpha_p(t_n) = \arcsin \frac{X_{mxp} - X_{mnp}}{D_p(t_n)}, \quad D_p(t_n) = \sqrt{(X_{mxp} - X_{mnp})^2 + (Y_{mxp} - Y_{mnp})^2},$$

де $X_{mxp} = L_{mx}(t_n) \sin K_{mx}$; $Y_{mxp} = L_{mx}(t_n) \cos K_{mx}$;

$$X_{mnp} = L_{mn}(t_n) \sin K_{mn}; \quad Y_{mnp} = L_{mn}(t_n) \cos K_{mn}.$$

У свою чергу відстані, що проходять судна до моменту закінчення перехідного процесу гальмування суден, визначаються виразами:

$$\begin{aligned} L_{mx}(t_n) &= V_{mx} t_n + S_{mx}, \\ L_{mn}(t_n) &= V_{mn} t_n + S_{mn} + V_{mny}(t_p - \tau_{mn}). \end{aligned} \quad (4.8)$$

У наведених виразах S_{mx} та S_{mn} – відстані гальмування суден, які залежать від обраного режиму гальмування кожного з суден.

Виконуючи маневр розходження зміною швидкостей пари суден можливі чотири варіанти режиму гальмування:

- активне гальмування використовують обидва судна (варіант А);
- пасивне гальмування використовують обидва судна (варіант В);
- перше судно виконує активне гальмування, а друге – пасивне гальмування (варіант С);
- перше судно виконує пасивне гальмування, а друге – активне гальмування (варіант D).

Розглянемо кожен з перелічених варіантів. При варіанті маневру розходження (А) за початковими V_1 , V_2 і вибраними V_{1y} , V_{2y} швидкостями суден визначаються тривалості τ_{1y} та τ_{2y} перехідних процесів для обох суден за допомогою таких виразів:

$$\begin{aligned} \tau_{1y} &= \frac{m_1}{\mu V_{yp1}} \left[\arctg \frac{V_1}{V_{yp1}} - \arctg \frac{V_{1y}}{V_{yp1}} \right], \\ \tau_{2y} &= \frac{m_2}{\mu V_{yp2}} \left[\arctg \frac{V_2}{V_{yp2}} - \arctg \frac{V_{2y}}{V_{yp2}} \right]. \end{aligned} \quad (4.9)$$

Також розраховуємо відстані S_1 та S_2 гальмування суден:

$$\begin{aligned}
S_1 &= \frac{m_1}{2\mu} \ln \left| \frac{V_1^2 + V_{yp1}^2}{V_{1y}^2 + V_{yp1}^2} \right|, \\
S_2 &= \frac{m_2}{2\mu} \ln \left| \frac{V_2^2 + V_{yp2}^2}{V_{2y}^2 + V_{yp2}^2} \right|.
\end{aligned} \tag{4.10}$$

При варіанті В маневру розходження (обидва судна знижують швидкості пасивним гальмуванням) величини τ_{1y} , τ_{2y} , S_1 та S_2 розраховуються за формулами:

$$\begin{aligned}
\tau_{1y} &= \frac{m_1}{\mu} \left(\frac{1}{V_{1y}} - \frac{1}{V_1} \right), \\
\tau_{2y} &= \frac{m_2}{\mu} \left(\frac{1}{V_{2y}} - \frac{1}{V_2} \right), \\
S_1 &= \frac{m_1}{2\mu} \ln \left| \frac{V_1^2}{V_{1y}^2} \right|, \\
S_2 &= \frac{m_2}{2\mu} \ln \left| \frac{V_2^2}{V_{2y}^2} \right|.
\end{aligned} \tag{4.11}$$

При варіанті розходження С (перше судно знижує швидкість активним гальмуванням, а друге – пасивним гальмуванням) маємо:

$$\begin{aligned}
\tau_{1y} &= \frac{m_1}{\mu V_{yp1}} \left[\operatorname{arctg} \frac{V_1}{V_{yp1}} - \operatorname{arctg} \frac{V_{1y}}{V_{yp1}} \right], \\
\tau_{2y} &= \frac{m_2}{\mu} \left(\frac{1}{V_{2y}} - \frac{1}{V_2} \right), \\
S_1 &= \frac{m_1}{2\mu} \ln \left| \frac{V_1^2 + V_{yp1}^2}{V_{1y}^2 + V_{yp1}^2} \right|,
\end{aligned} \tag{4.12}$$

$$S_2 = \frac{m_2}{2\mu} \ln \left| \frac{V_2^2}{V_{2y}^2} \right|.$$

І, нарешті, при варіанті D маневру розходження його параметри τ_{1y} , τ_{2y} , S_1 та S_2 розраховуються таким чином:

$$\begin{aligned} \tau_{1y} &= \frac{m_1}{\mu} \left(\frac{1}{V_{1y}} - \frac{1}{V_1} \right), \\ \tau_{2y} &= \frac{m_2}{\mu V_{yp2}} \left[\arctg \frac{V_2}{V_{yp2}} - \arctg \frac{V_{2y}}{V_{yp2}} \right], \\ S_1 &= \frac{m_1}{2\mu} \ln \left| \frac{V_1^2}{V_{1y}^2} \right|, \\ S_2 &= \frac{m_2}{2\mu} \ln \left| \frac{V_2^2 + V_{yp2}^2}{V_{2y}^2 + V_{yp2}^2} \right|. \end{aligned} \quad (4.13)$$

Порівнюючи отримані величини τ_{1y} та τ_{2y} , знаходимо характеристики для виразу (4.8). Якщо справедливою є нерівність $\tau_{1y} > \tau_{2y}$, тоді:

$$\begin{aligned} \tau_{mx} &= \tau_{1y}, \tau_{mn} = \tau_{2y}, S_{mx} = S_1, S_{mn} = S_2, V_{mx} = V_1, V_{mn} = V_2, V_{mny} = V_{2y}, \\ K_{mx} &= K_1, K_{mn} = K_2. \end{aligned}$$

В разі $\tau_{1y} < \tau_{2y}$:

$$\begin{aligned} \tau_{mx} &= \tau_{2y}, \tau_{mn} = \tau_{1y}, S_{mx} = S_2, S_{mn} = S_1, V_{mx} = V_2, V_{mn} = V_1, V_{mny} = V_{1y}, \\ K_{mx} &= K_2, K_{mn} = K_1. \end{aligned}$$

Використовуючи отримані параметри, починаючи з $t_n = 0$ і збільшуючи його в кожному циклі на вибраний приріст Δt_n , за допомогою виразів (4.8)

розраховуються значення $L_{mx}(t_n)$ та $L_{mn}(t_n)$. Потім за формулою (4.7) розраховується дистанція найкоротшого зближення D_{min} . Розрахунки тривають поки не настане рівність $D_{min} = D_d$, при якій $t_n = t_n^*$, що відповідає оптимальному маневру розходження.

На практиці в ситуаціях небезпечного зближення можуть виникнути чинники, що заважають, та не дають можливості вибрати для розходження оптимальне значення моменту часу початку маневру t_n^* (інші судна, плавальні засоби та інше). У таких ситуаціях необхідно вибрати t_n найближче до оптимального значення t_n^* , але таке, що забезпечує безпечне розходження суден при заданих режимах гальмування.

Виходячи з вище сказаного, є доцільною розробка комп'ютерної програми, яка дозволяє вираховувати значення D_{min} при покроковій зміні величини t_n . У проведеному дослідженні пропонується варіант такої комп'ютерної програми, що дозволяє визначити значення t_n^* за зміною дистанції найкоротшого зближення D_{min} . Спочатку передбачено введення параметрів ситуації небезпечного зближення двох суден: пеленга α_0 , дистанції D_0 , швидкостей V_1 , V_2 , курсів K_1 , K_2 та гранично допустимої дистанції D_d . Як показано на рис. 4.11, дані параметри виводяться на монітор, причому розраховується і виводиться дистанція найкоротшого зближення D_{min} . Для наведеної ситуації небезпечного зближення параметри дорівнюють наступним значенням: $\alpha_0 = 229^\circ$, $D_0 = 5$ миль, $K_1 = 267^\circ$, $K_2 = 24^\circ$, $V_1 = 18$ вуз., $V_2 = 19$ вуз., $D_d = 1$ миля. У правій частині екрана показана початкова ситуація зближення.

Для безпечного розходження суден зміною швидкості обрана точка швидкостей розходження, яка не належить області небезпечних швидкостей, причому $V_{1y} = 13$ вуз., $V_{2y} = 7$ вуз., як показано на рис. 4.12. В цьому разі при

досягненні швидкостей суден значень $V_{1y} = 13$ вуз. та $V_{2y} = 7$ вуз. відносний курс дорівнює 246° .

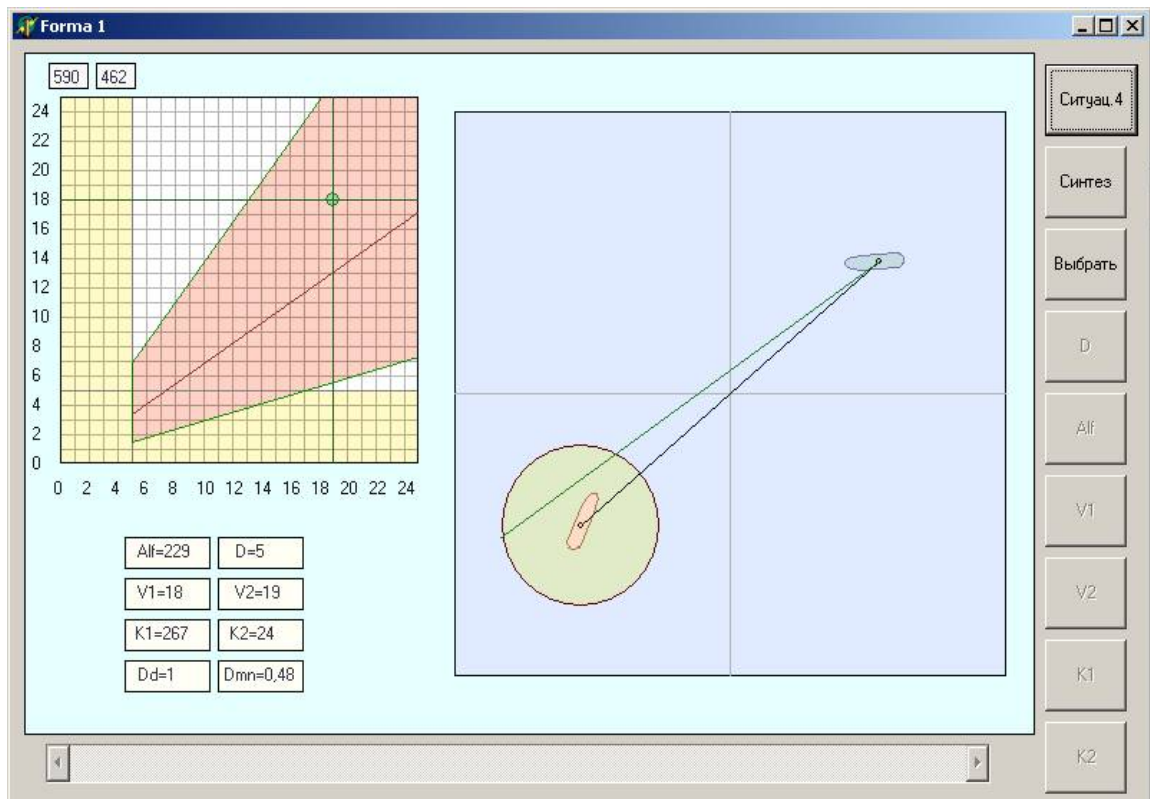


Рис. 4.11. Відображення ситуації небезпечного зближення

За допомогою клавіш, що позначають судна і режим їх гальмування, активним гальмуванням вибрано зниження швидкості для першого судна. Потім, як показано на рис. 4.13, і для іншого судна вибираємо режим активного гальмування. Програма виконує необхідні розрахунки і на рис. 4.14 показано як на екран виводяться тривалості перехідних процесів для кожного з суден $\tau_{1y} = 23$ с та $\tau_{2y} = 82$ с та пройдені за цей час відстані $S_1 = 0,98$ кбт і $S_2 = 2,63$ кбт відповідно. Також виводиться повідомлення про можливість маневру розходження та оптимальне значення $t_n^* = 227$ с, при якому $D_{\min} = 0,99$ милі, тобто одну гранично допустиму дистанцію D_d .

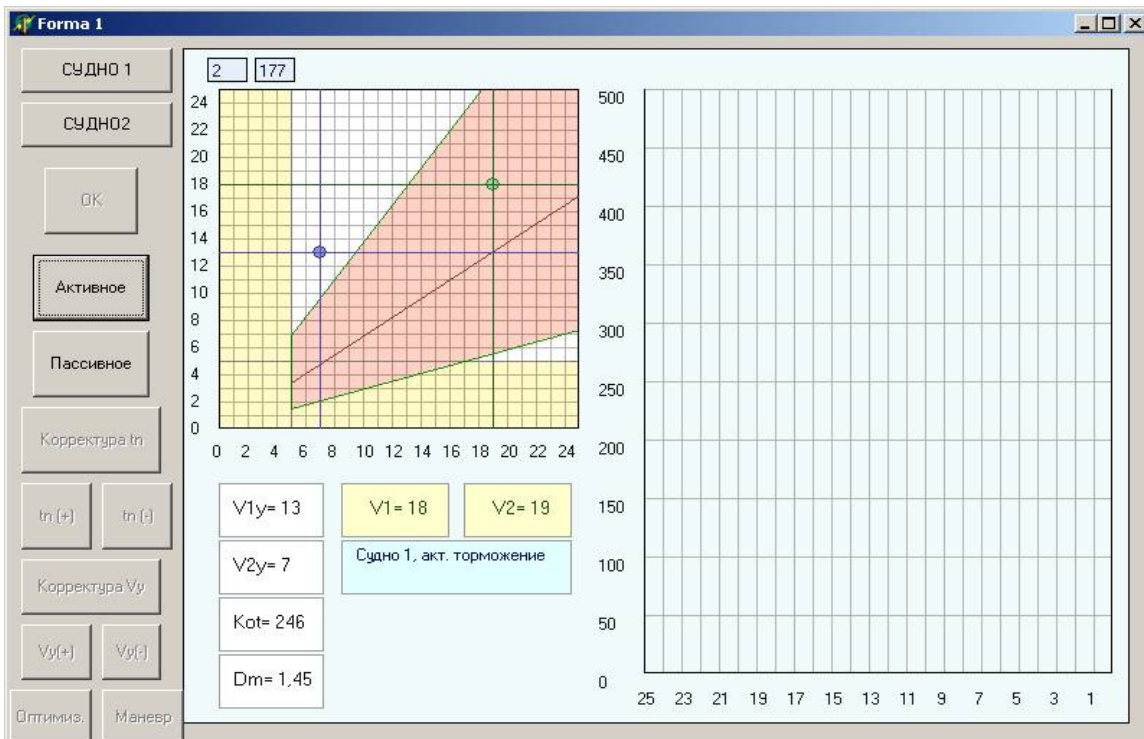


Рис. 4.12. Вибір режиму гальмування першого судна

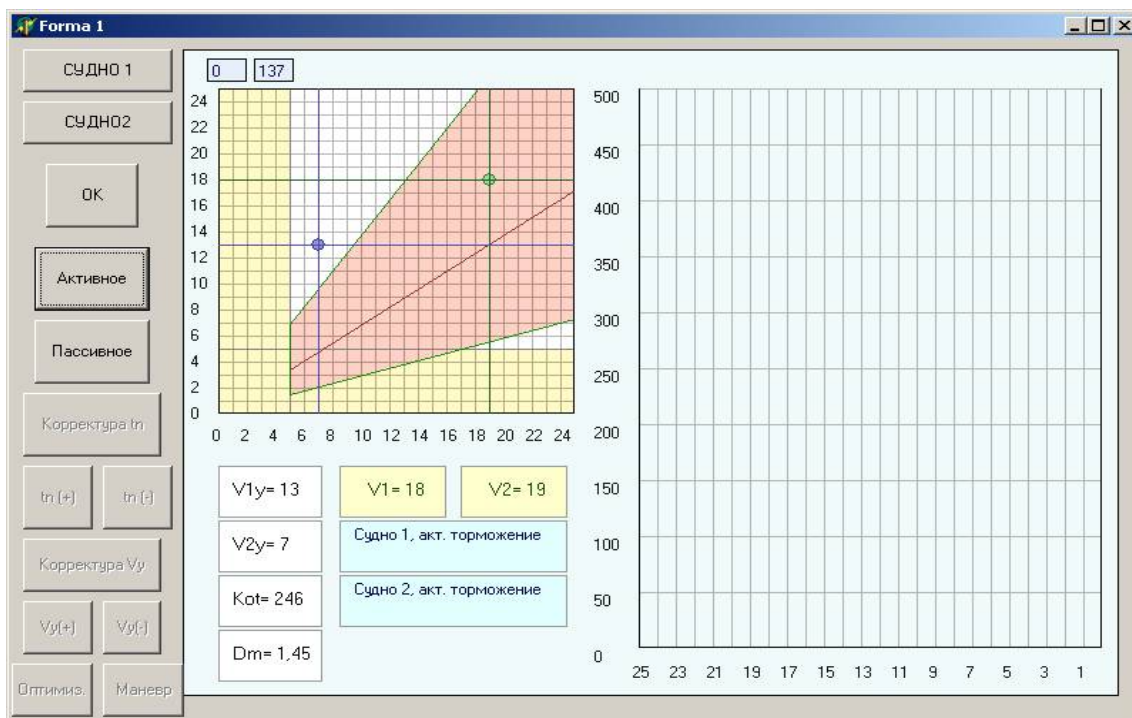


Рис. 4.13. Вибір активного гальмування другим судном

У правій частині екрана приведені криві залежності швидкості суден від часу при активному гальмуванні, причому на кривих відзначені початкові

швидкості і швидкості суден, які обрані для розходження. На рис. 4.15 приведена характеристика маневру розходження при $t_n = 0$. І при цьому дистанція найкоротшого зближення $D_{\min} = 1,39$ милі.

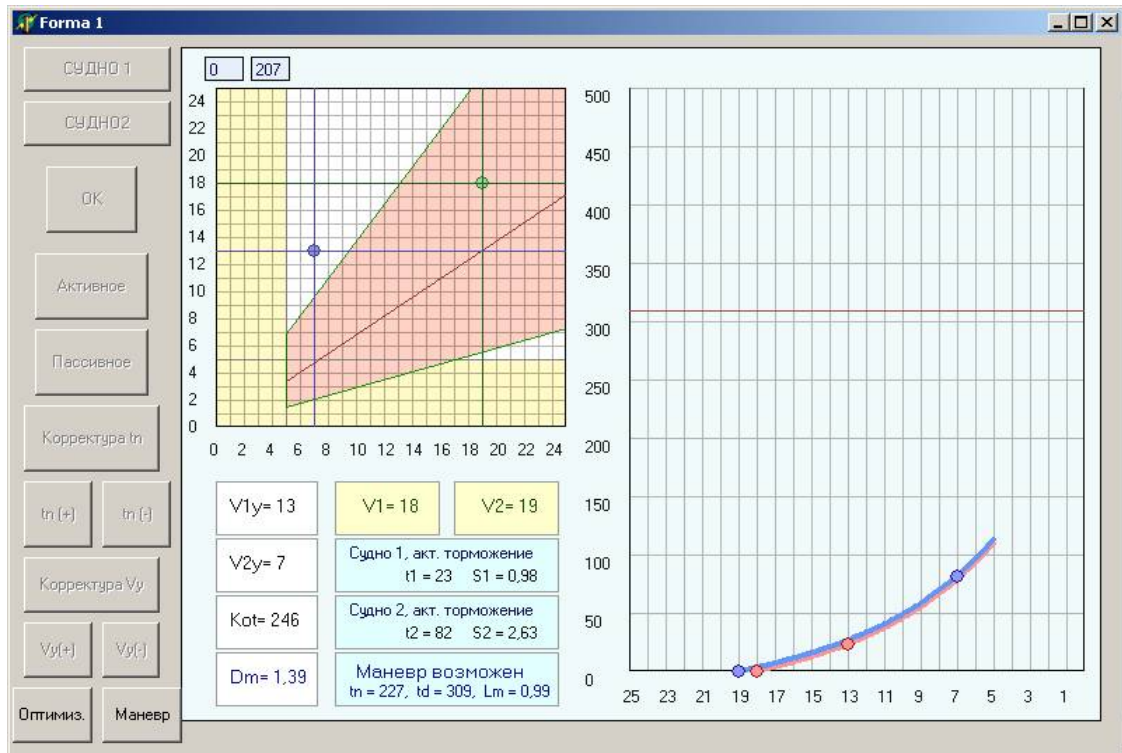
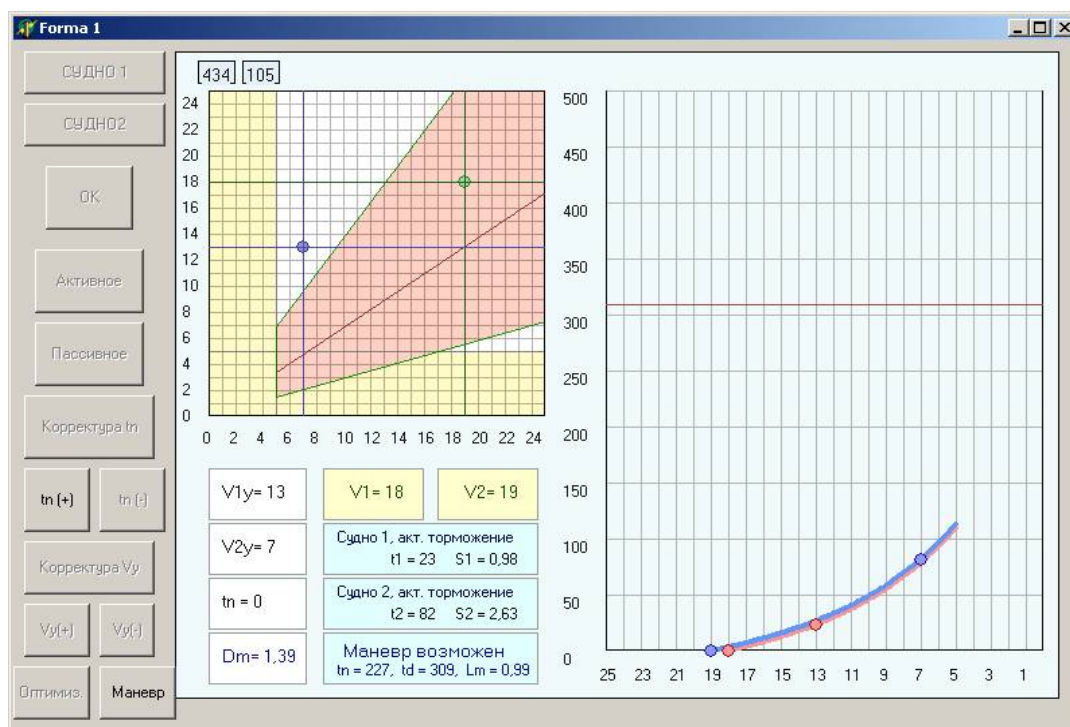
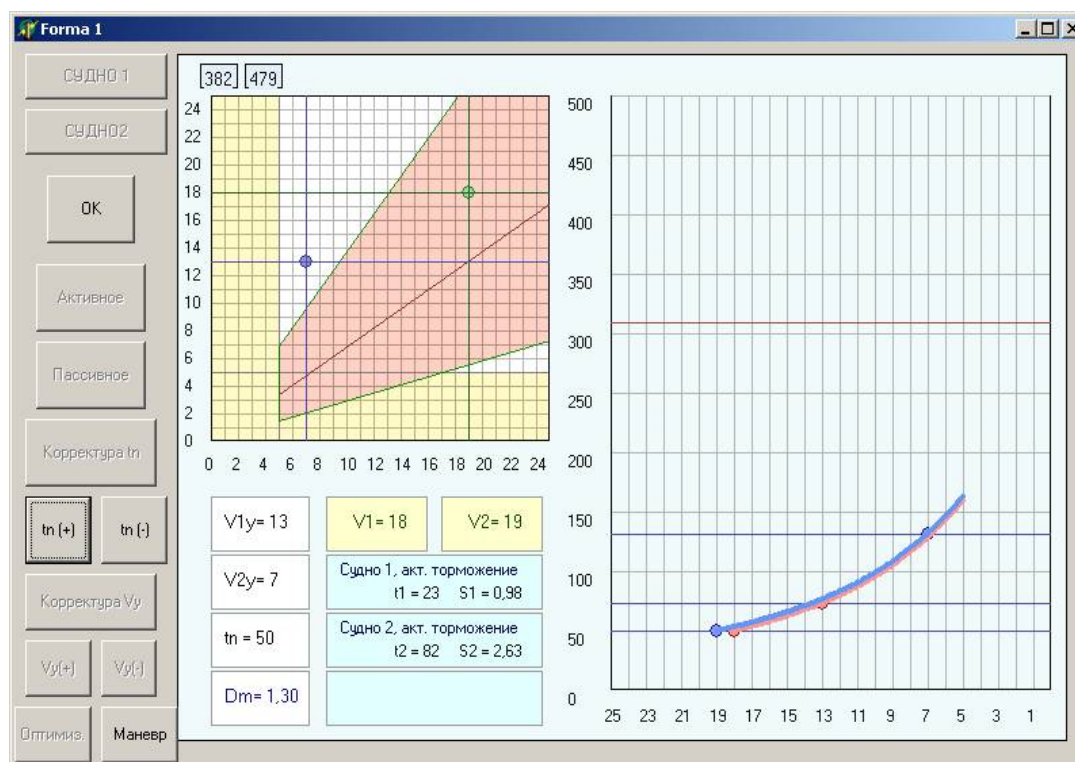


Рис. 4.14. Криві активного гальмування суден

На рис. 4.16 і 4.17 представлені характеристики маневру розходження відповідно при $t_n = 50$ с та $t_n = 150$ с.

Як випливає з рис. 4.15, час найкоротшого зближення $t_d = 309$ с позначений на правому графіку горизонтальною лінією, а обидві криві залежності часу від швидкості починаються з нульового моменту. Зі збільшенням часу моменту початку гальмування t_n обидві криві гальмування переміщуються вгору на величину t_n . На рис. 4.16 криві зміщені вгору на 50 с, а на рис. 4.17 – на 150 с відповідно. При цьому горизонтальна лінія на графіку, що відповідає закінченню перехідного процесу, наближається до лінії $t_d = 309$.

Рис. 4.15. Характеристика маневру розходження при $t_n = 0$ Рис. 4.16. Характеристика маневру розходження при $t_n = 50$ с

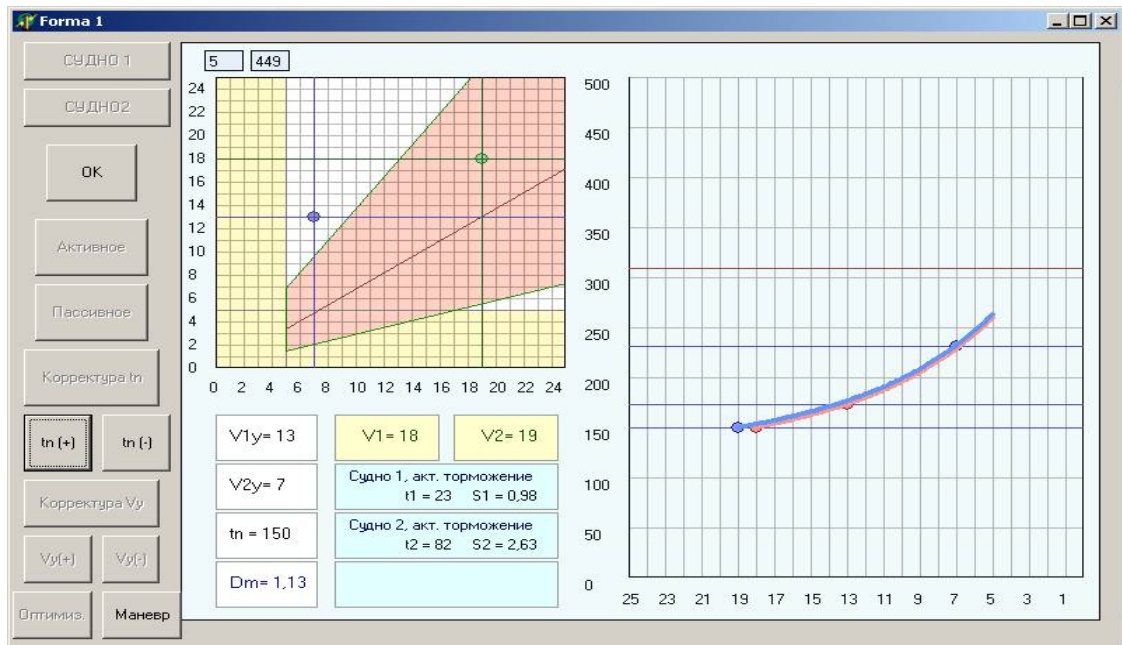


Рис. 4.17. Характеристика маневру розходження при $t_n = 150$ с

Так, на рис. 4.18 $t_n = t_n^* = 226$ с лінія закінчення перехідного процесу поєднана з лінією, відповідною $t_d = 309$ і оптимальному маневру відповідає $D_{\min} = 1,00$ милі.

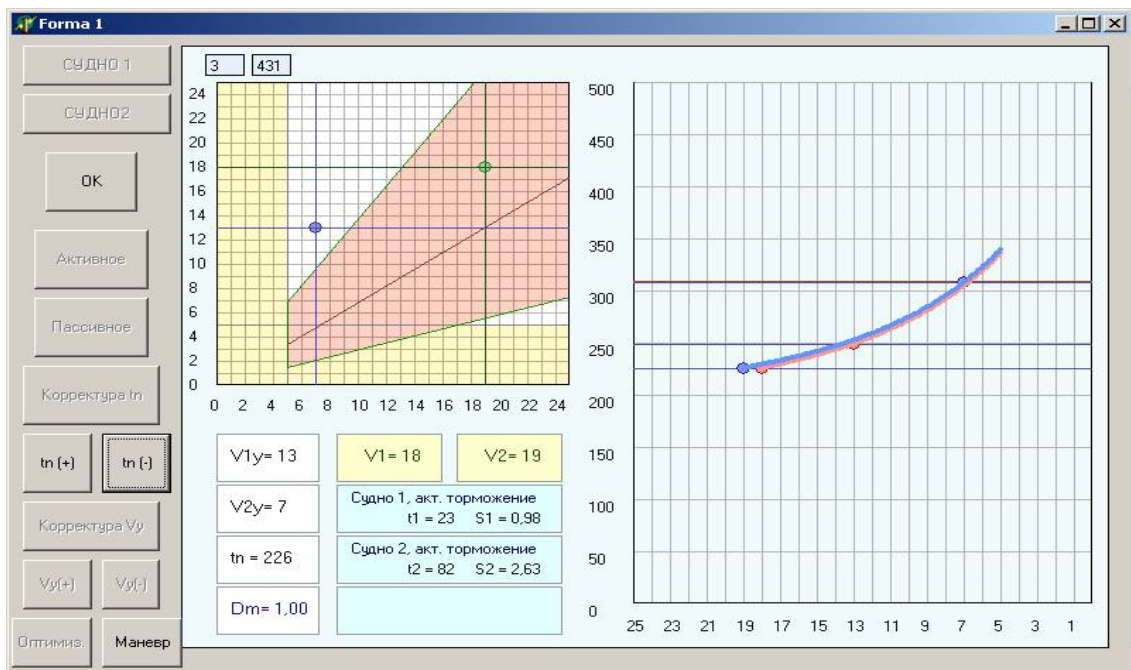


Рис. 4.18. Характеристика маневру розходження при $t_n = t_n^* = 226$ с.

У Додатку А.4 розглянуті ще три ситуації для визначення значення $D_{\min}$ при покроковій зміні величини t_n , які показали коректність запропонованого методу. Отже, за допомогою процедури комп'ютерного графічного визначення оптимального маневру розходження зміною швидкостей, з заданими режимами гальмування для кожного з суден, що небезпечно зближуються, визначається можливість виконання обраного маневру. При позитивному результаті вибирається оптимальний маневр або маневр максимально близький до оптимального, як це було показано чотирма ситуаціями небезпечного зближення і вибраними оптимальними маневрами розходження з поєднанням різних режимів гальмування суден.

У загальному випадку можлива оптимізація маневру розходження двома альтернативними способами: оптимізація моментів часу початку гальмування суден t_n при заданих значеннях швидкостей розходження V_{1y} та V_{2y} , другий же спосіб передбачає гальмування суден в початковий момент часу $t_n = 0$, а оптимізація проводиться вибором швидкостей V_{1y} та V_{2y} . Розглянемо вибір оптимального маневру іншим альтернативним способом, коли при незмінному заданому моменті часу початку гальмування обох суден $t_n = 0$ с вибираються швидкості для розходження V_{1y} та V_{2y} , що забезпечують розходження суден на дистанції найкоротшого зближення, яка дорівнює гранично допустимій дистанції. Для прикладу вибираємо ситуацію зближення 1, характеристики якої представлені на рис. 4.19.

Після застосування клавіші «Обрати» на екрані виводяться вихідні елементи для вибору швидкостей розходження суден (рис. 4.20). «Клікаємо» лівою кнопкою мишки положення курсору в точці вибраних швидкостей для розходження (дивись рис. 4.21) – та отримуємо наступні значення швидкостей суден $V_{1y} = 15$ вуз. та $V_{2y} = 6$ вуз. Потім клавішами «Судно 1» і «Судно 2» вибирається режим гальмування, причому для обох суден в даному випадку вибрали активне гальмування після чого використовуємо клавішу «ОК».

На рис. 4.22 показано що маневр розходження можливий, причому вка-

зані параметри гальмування обох суден (періоди гальмування $\tau_{1y}=9$ с, $\tau_{2y}=105$ с, і відстані $S_1=0,38$ кбт. та $S_2=3,37$ кбт.). Також вказується оптимальний час початку гальмування $t_n^*=14$ с та момент часу закінчення процесу гальмування $t_d=119$ с.

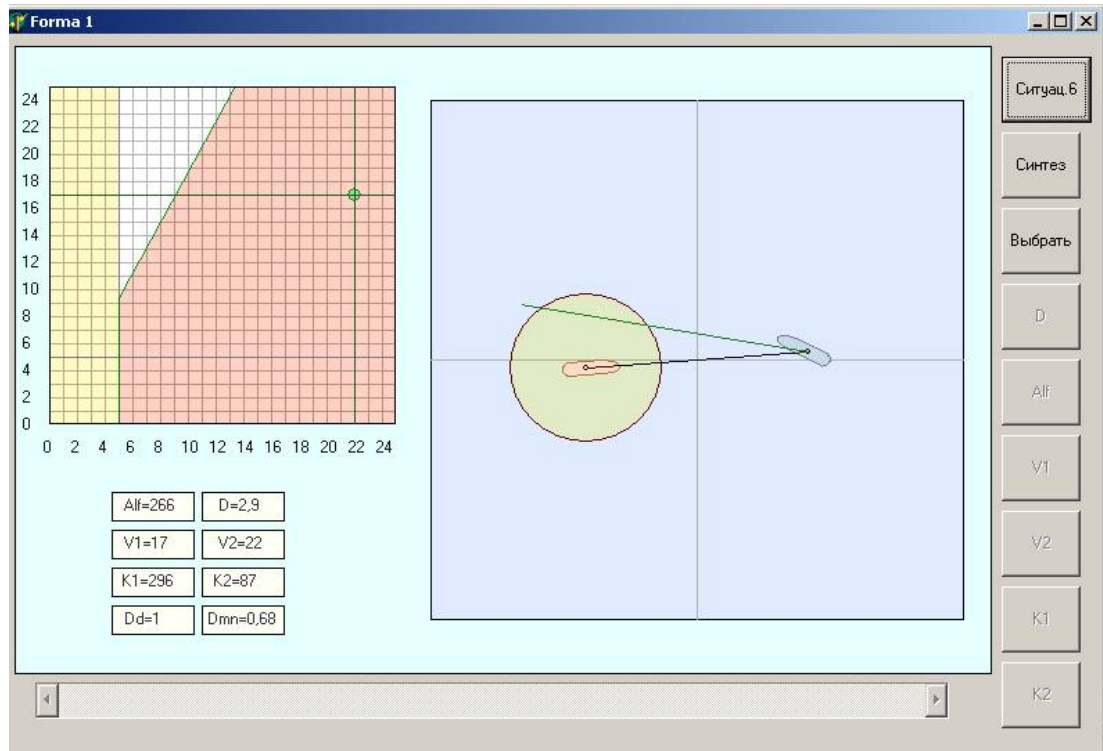


Рис. 4.19. Характеристики ситуації небезпечного зближення 1

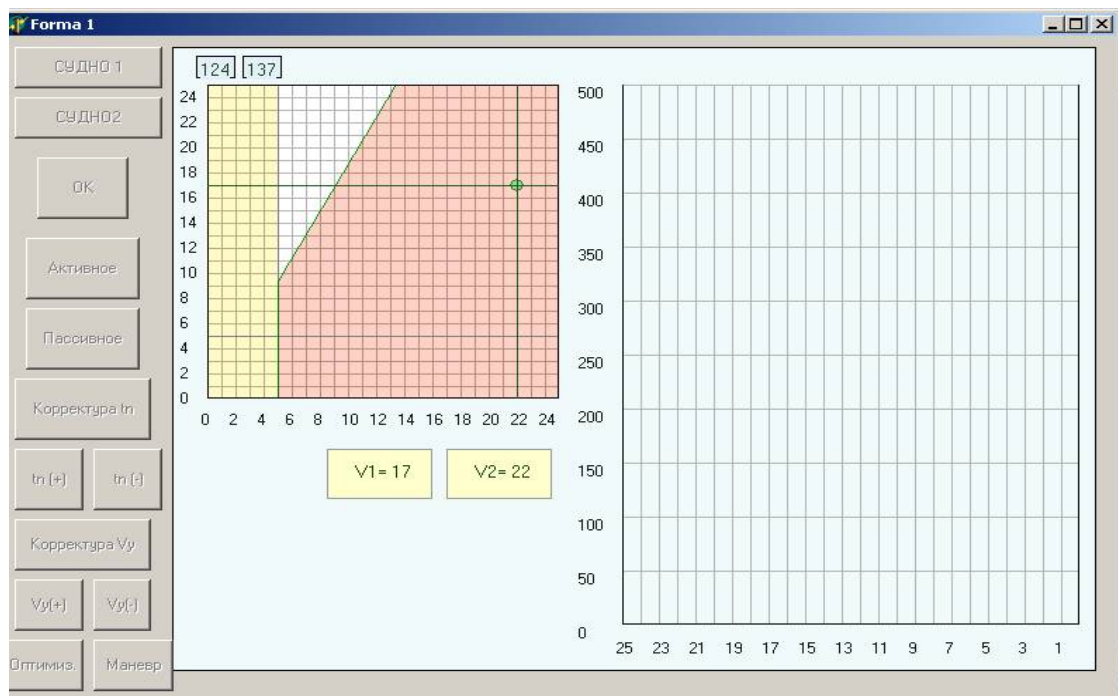


Рис. 4.20. Виведення вихідних елементів

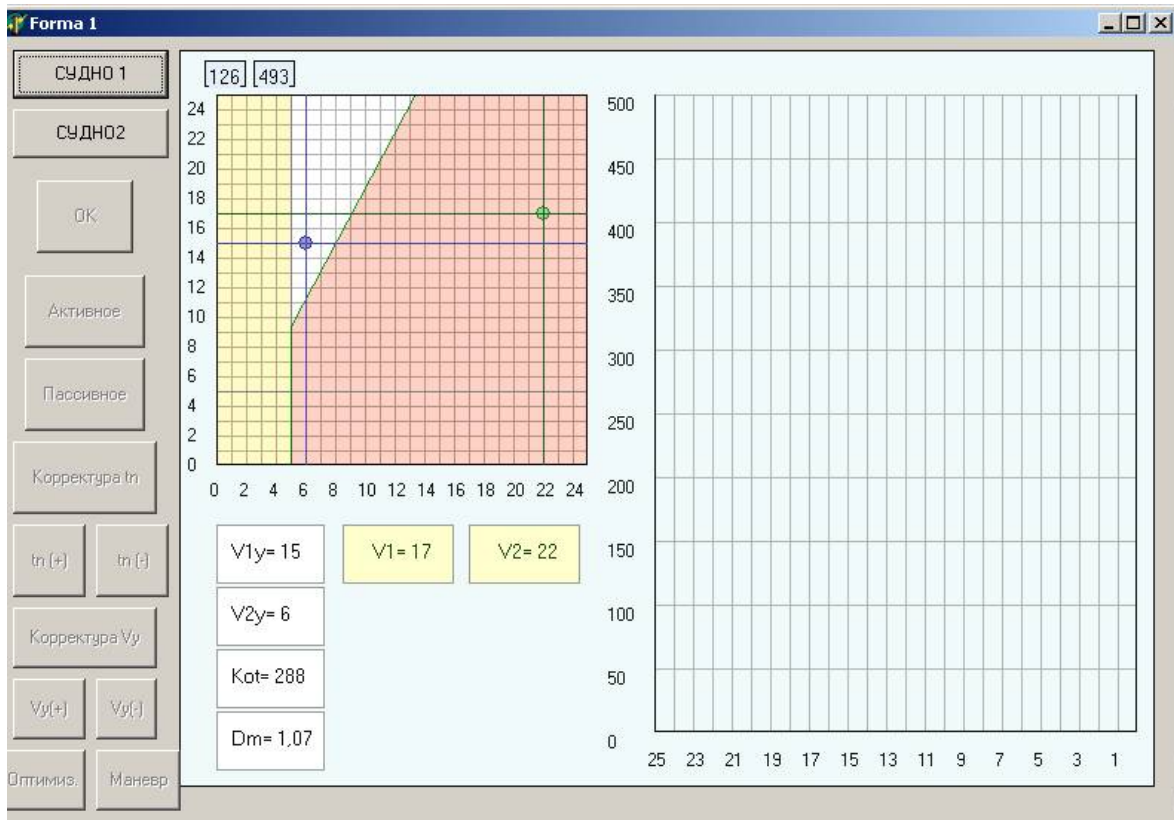


Рис. 4.21. Початковий вибір безпечних швидкостей розходження

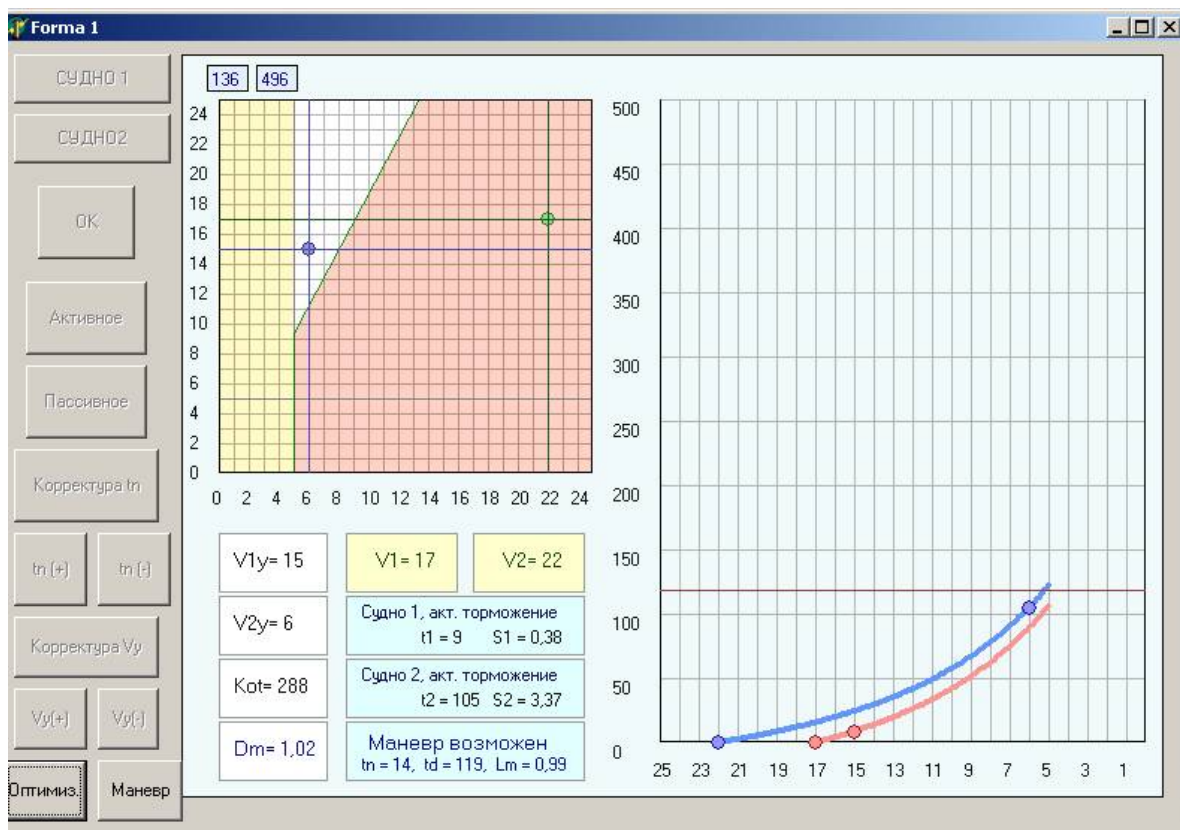


Рис. 4.22. Інформація щодо оптимального часу початку маневру

На рис. 4.23 показано як після натискання клавіші «Оптиміз.» активізуються клавіші «Коректура t_n » та «Коректура V_y ». Для оптимізації маневру за швидкостями розходження слід «клікнути» клавішу «Коректура V_y », після чого активізуються клавіші «Судно 1» і «Судно 2» для вибору судна, швидкість якого плануємо змінювати (рис. 4.24). Для зміни швидкості розходження клавішею «Судно 1» спочатку було вибрано перше судно. При цьому з'являється зафарбований прямокутник на табло індикації швидкості розходження першого судна як показано на рис. 4.25. «Клікаючи» знижуємо швидкість першого судна, що виражається показаннями інформаційного табло і зниженням положення лінії, яка відповідає значенню введеної швидкості розходження. Як видно на рис. 4.26 вводиться швидкість першого судна, що дорівнює $V_{1y} = 14,5$ вуз., на що також вказує горизонтальна лінія показчика швидкостей.



Рис. 4.23. Вибір режимів оптимізації

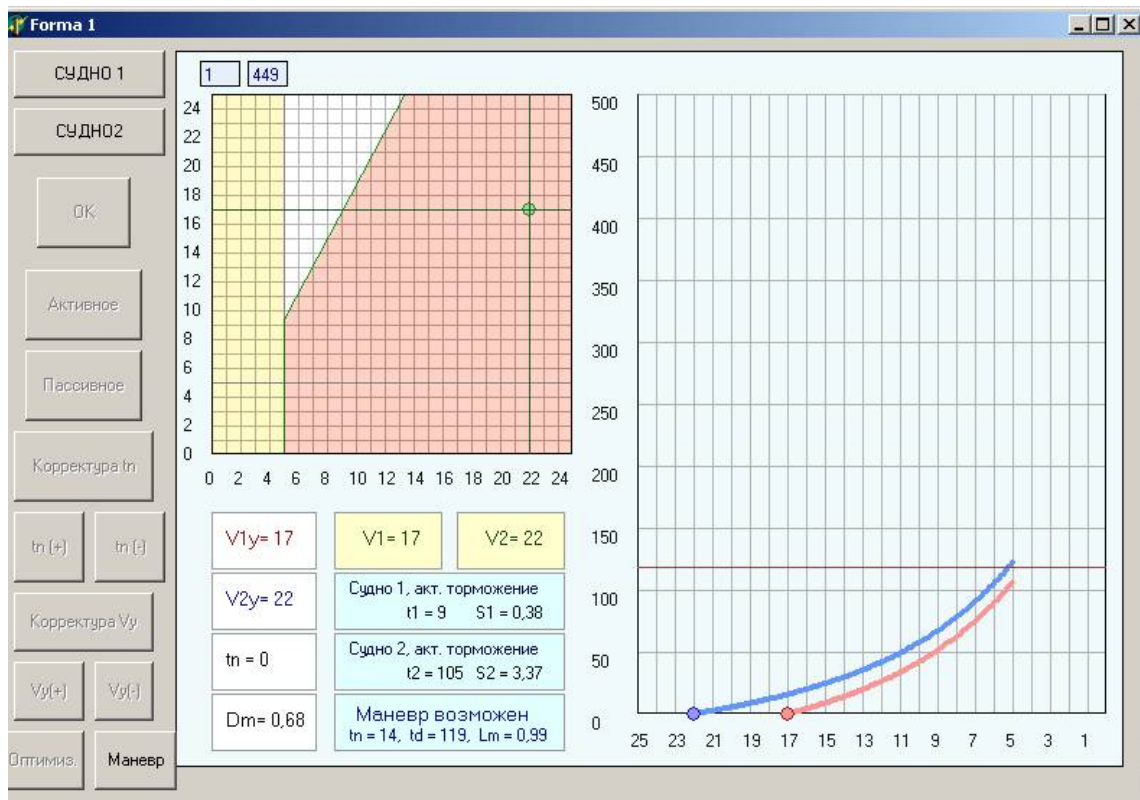


Рис. 4.24. Вибір судна для зниження швидкості

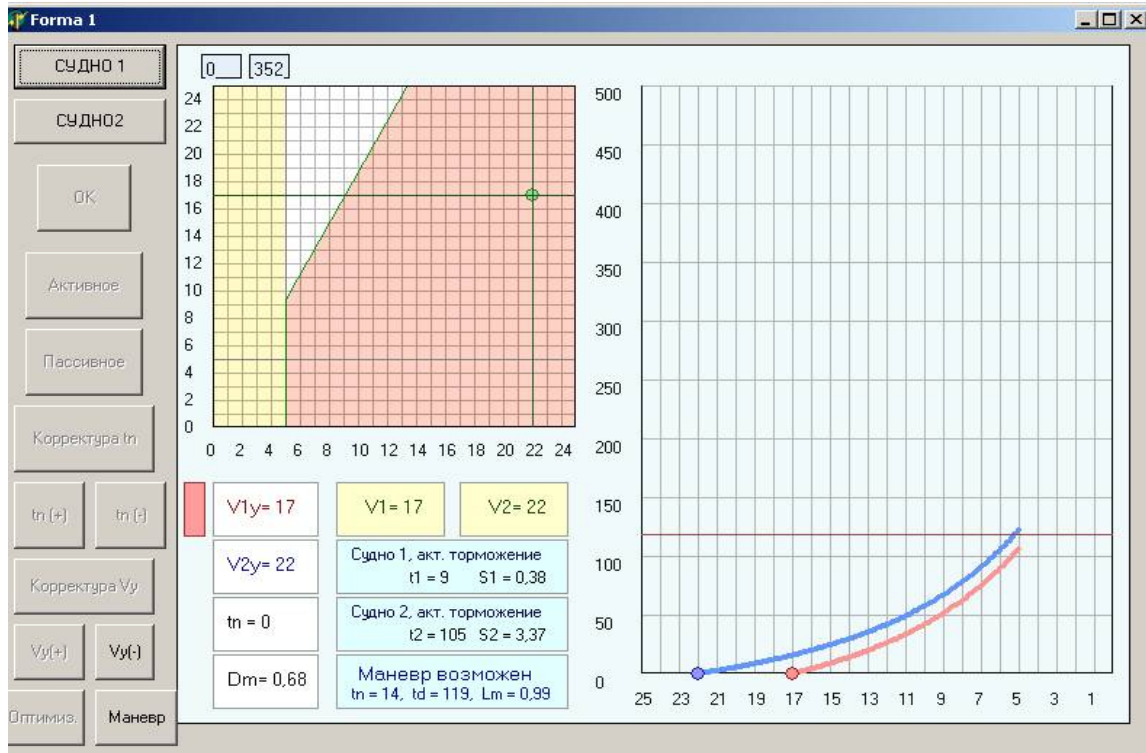


Рис. 4.25. Інтерфейс при виборі швидкості першого судна

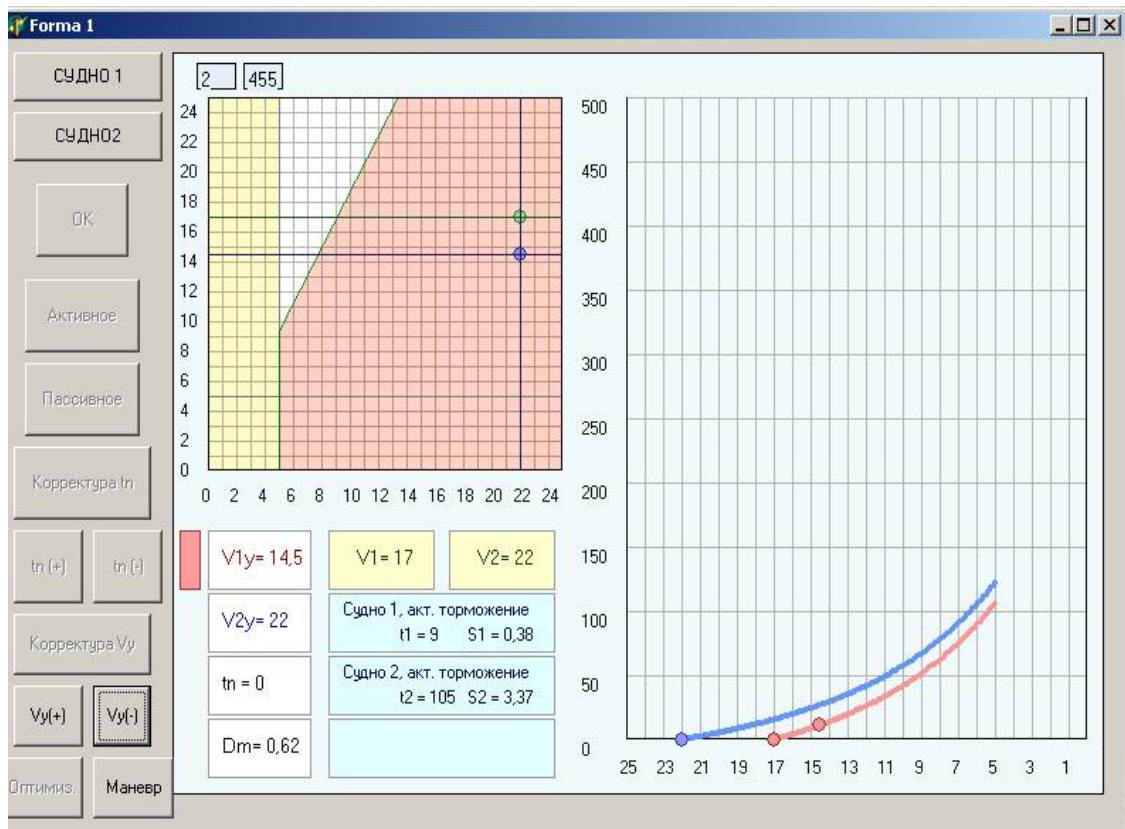


Рис. 4.26. Коректура швидкості розходження першого судна

Зауважимо, що при зміні швидкості розходження першого судна на кривій його гальмування з'являється точка, положення якої відповідає значенню введеної швидкості $V_{1y} = 14,5$ вуз. Потім вибирається друге судно, а кольоровий прямокутник переміщується на позицію перед інформаційним табло швидкості розходження другого судна, що показано на рис. 4.27. Зміна значення швидкості розходження другого судна досягається «кліканням» темного прямокутника, до тих пір поки не буде досягнуто необхідну швидкість розходження. Її значення контролюється величиною дистанції найкоротшого зближення.

Зміна швидкості розходження другого судна завершується при досягненні дистанція найкоротшого зближення величини гранично допустимої дистанції (0,99 милі), як показано на рис. 4.28. А швидкість розходження для другого судна відповідно дорівнює $V_{2y} = 6,5$ вуз.

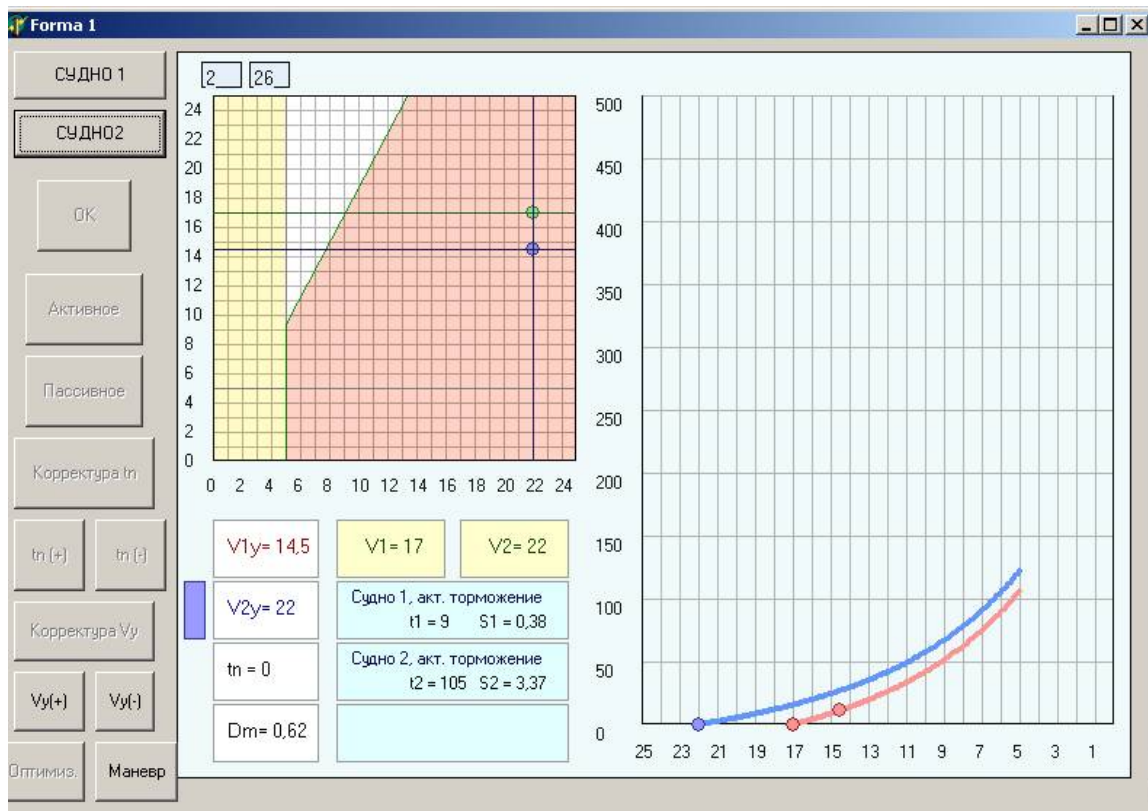


Рис. 4.27. Вибір другого судна для коректури швидкості розходження

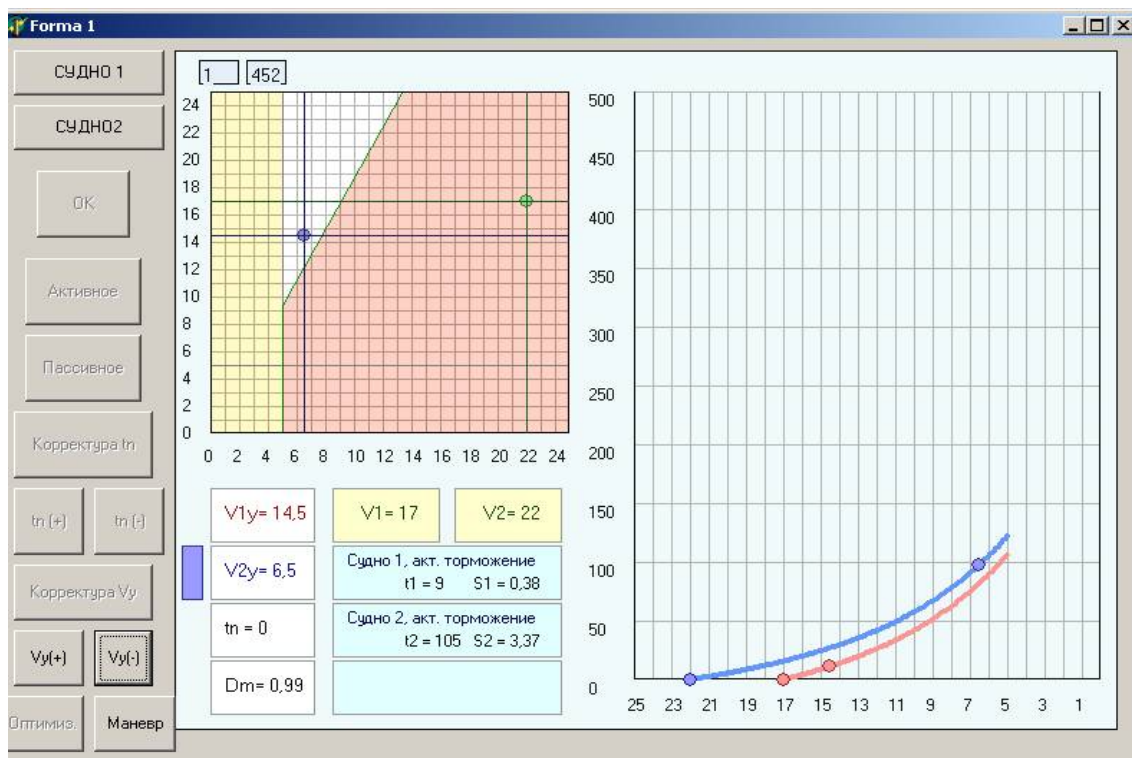


Рис. 4.28. Коректура швидкості розходження другого судна

Отже, у розглянутій ситуації небезпечного зближення маневр розходження виконується початком активного гальмування обох суден в нульовий момент часу, причому перше судно знижує швидкість до 14,5 вузлів, а друге – до 6,5 вузлів. З цими швидкостями судна прямують до моменту часу найкоротшого зближення, а потім збільшують швидкості до початкових значень.

4.3. Формування і застосування області неприпустимих значень курсів одного судна і швидкостей другого судна

Розглянемо принцип формування області неприпустимих значень курсів одного судна і швидкостей другого судна, яку позначимо Ω_{KV} . Очевидно, що межу області Ω_{KV} на площині $K_1 \times V_2$ складають точки (K_1, V_2) , що задовольняють умові $\min D(K_1, V_2) = D_d$. Аналітично це виражається наступним чином. З виразу для $\min D$ отримаємо:

$$K_{ot} = \alpha \mp \arcsin\left(\frac{D_d}{D}\right),$$

тому справедливою є рівність:

$$\operatorname{tg} K_{ot} = \operatorname{tg}\left[\alpha \pm \arcsin\left(\frac{D_d}{D}\right)\right]. \quad (4.14)$$

Позначаємо $\gamma^{(1,2)} = \alpha \mp \arcsin\left(\frac{D_d}{D}\right)$, отже,

$$\operatorname{tg} K_{ot} = \operatorname{tg} \gamma^{(1,2)}.$$

Враховуючи

$$\operatorname{tg} K_{ot} = \frac{V_1 \sin K_1 - V_2 \sin K_2}{V_1 \cos K_1 - V_2 \cos K_2},$$

отримаємо

$$\frac{V_1 \sin K_1 - V_2 \sin K_2}{V_1 \cos K_1 - V_2 \cos K_2} = \frac{\sin \gamma^{(1,2)}}{\cos \gamma^{(1,2)}}, \quad (4.15)$$

звідки записуємо залежність між курсом одного судна K_1 і швидкістю іншого судна V_2 , що задовольняють умові $D_{\min} = D_d$.

Вираз (4.15) приймає наступний вигляд:

$$\sin K_1 \cos \gamma^{(1,2)} - \cos K_1 \sin \gamma^{(1,2)} = \frac{V_2}{V_1} (\sin K_2 \cos \gamma^{(1,2)} - \cos K_2 \sin \gamma^{(1,2)}),$$

або

$$\sin(K_1 - \gamma^{(1,2)}) = \frac{\sin(K_2 - \gamma^{(1,2)})}{V_1} V_2. \quad (4.16)$$

Якщо позначити $\mu^{(1,2)} = \frac{\sin(K_2 - \gamma^{(1,2)})}{V_1}$, то $V_2^{(1,2)} = \frac{\sin(K_1 - \gamma^{(1,2)})}{\mu^{(1,2)}}$.

Отже, існують дві межі, на яких досягається рівність $\min D = D_d$:

$$V_2^{(1)} = \frac{\sin(K_1 - \gamma^{(1)})}{\mu^{(1)}} = \frac{V_1}{\sin[K_2 - (\alpha + \arcsin \frac{D_d}{D})]} \sin[K_1 - (\alpha - \arcsin \frac{D_d}{D})],$$

$$V_2^{(2)} = \frac{\sin(K_1 - \gamma^{(2)})}{\mu^{(2)}} = \frac{V_1}{\sin[K_2 - (\alpha - \arcsin \frac{D_d}{D})]} \sin[K_1 - (\alpha + \arcsin \frac{D_d}{D})]. \quad (4.17)$$

При розгляданні зміни швидкості гальмуванням значення швидкостей $V_2^{(1,2)}$ мають задовольняти умові $V_{2n} > V_2^{(1,2)} \geq 0$, де V_{2n} – початкова швидкість судна, що змінює при розходженні швидкість.

Визначимо, які значення курсу K_1 відповідають граничним значенням 0

і V_{2n} швидкості $V_2^{(1,2)}$. Насамперед, відзначимо, що межі не можливо визначити для ситуації, коли $K_2 = \alpha \pm \arcsin \frac{D_d}{D}$. Очевидно, з рівнянь меж (4.17):

$$K_1(V_2^{(1,2)} = 0) = \alpha \mp \arcsin \frac{D_d}{D} = \gamma^{(1,2)}.$$

Для визначення другого значення $K_1(V_2^{(1,2)} = V_{2n})$ розглянемо рівняння:

$$V_2^{(1,2)} = \frac{\sin(K_1 - \gamma^{(1,2)})}{\mu^{(1,2)}}$$

і підставляємо

$$V_2^{(1,2)} = V_{2n} :$$

$$V_{2n} = \frac{\sin(K_1 - \gamma^{(1,2)})}{\mu^{(1,2)}},$$

звідки

$$\sin(K_1 - \gamma^{(1,2)}) = \frac{V_{2n}}{V_1} \sin(K_2 - \gamma^{(1,2)}),$$

тому

$$K_1 = \gamma^{(1,2)} + \arcsin\left[\frac{V_{2n}}{V_1} \sin(K_2 - \gamma^{(1,2)})\right],$$

або

$$K_1(V_2^{(1,2)} = V_{2n}) = \gamma^{(1,2)} + \arcsin\left[\frac{V_{2n}}{V_1} \sin(K_2 - \gamma^{(1,2)})\right].$$

В разі $V_1 > V_{2n}$ існують значення $K_1(V_2^{(1,2)} = V_{2n})$ для обох меж, а якщо $V_1 < V_{2n}$, то потрібно враховувати співвідношення між величиною $\gamma^{(1,2)}$ і екстремальними відносними курсами $K_{\text{отmax}}$ та $K_{\text{отmin}}$.

Розглянемо випадок, коли $V_1 > V_{2n}$ і знайдемо граничні значення курсу першого судна

$$K_1(V_2^{(1)} = 0) = \alpha - \arcsin \frac{D_d}{D} = \gamma^{(1)};$$

$$K_1(V_2^{(2)} = 0) = \alpha + \arcsin \frac{D_d}{D} = \gamma^{(2)};$$

$$K_1(V_2^{(1)} = V_{2n}) = \gamma^{(1)} + \arcsin \left[\frac{V_{2n}}{V_1} \sin(K_2 - \gamma^{(1)}) \right];$$

$$K_1(V_2^{(2)} = V_{2n}) = \gamma^{(2)} + \arcsin \left[\frac{V_{2n}}{V_1} \sin(K_2 - \gamma^{(2)}) \right].$$

Введемо позначення:

$$K_{1\min}^{(1)} = K_1(V_2^{(1)} = 0), \quad K_{1\min}^{(2)} = K_1(V_2^{(2)} = 0),$$

$$K_{1\max}^{(1)} = K_1(V_2^{(1)} = V_{2n}), \quad K_{1\max}^{(2)} = K_1(V_2^{(2)} = V_{2n}).$$

З урахуванням прийнятих позначень:

$$K_{1\min}^{(1)} = \alpha - \arcsin \frac{D_d}{D} = \gamma^{(1)},$$

$$K_{1\min}^{(2)} = \alpha + \arcsin \frac{D_d}{D} = \gamma^{(2)},$$

$$K_{1\max}^{(1)} = \gamma^{(1)} + \arcsin \left[\frac{V_{2n}}{V_1} \sin(K_2 - \gamma^{(1)}) \right],$$

$$K_{1\max}^{(2)} = \gamma^{(2)} + \arcsin \left[\frac{V_{2n}}{V_1} \sin(K_2 - \gamma^{(2)}) \right].$$

Звертаємо увагу на те, що зміна швидкості другого судна V_2 на ділянці $V_2 \in (0, V_{2n})$ для першої межі відбувається на ділянці курсів

$K_1 \in (K_{1\min}^{(1)}, K_{1\max}^{(1)})$, тобто на інтервалі $\Delta K_1^{(1)} = K_{1\max}^{(1)} - K_{1\min}^{(1)}$ або з урахуванням отриманих виразів $\Delta K_1^{(1)} = \arcsin\left[\frac{V_{2n}}{V_1} \sin(K_2 - \gamma^{(1)})\right]$. Аналогічно для другої

межі одержимо вирази: $K_1 \in (K_{1\min}^{(2)}, K_{1\max}^{(2)})$ та $\Delta K_1^{(2)} = \arcsin\left[\frac{V_{2n}}{V_1} \sin(K_2 - \gamma^{(2)})\right]$. Зауважимо, що інтервали $\Delta K_1^{(1)}$ та $\Delta K_1^{(2)}$

менше $\pi/2$, тому на вказаних інтервалах значення швидкості V_2 для обох меж монотонно зростає. І з урахуванням отриманих результатів область Ω_{KV} небезпечних параметрів курсу одного судна і швидкості другого судна, укладена між першою G_{1KV} і другою G_{2KV} межами для випадку $V_1 > V_{2n}$ виглядає, як показано на рис. 4.29. Тому, якщо точка з початковими параметрами руху суден $M_n(K_{n1}, V_{2n})$ знаходиться між першою G_{1KV} і другою G_{2KV} межами, тобто $(K_{n1}, V_{2n}) \in \Omega_{KV}$, то має місце нерівність $\min D(K_{n1}, V_{2n}) < d_d$, і зближення суден є небезпечним. В цьому випадку необхідно вибрати параметри ухилення судів K_{1y} та V_{2y} , таким чином, щоб відповідна їм точка $M_y(K_{1y}, V_{2y})$ знаходилась на найближчій до точки $M_n(K_{n1}, V_{2n})$ межі області Ω_{KV} і відстань між точками M_n та M_y була мінімальною як показано на рис. 4.29.

Якщо швидкість другого судна більше швидкості першого, яке маневрує зміною курсу, тобто $V_1 < V_{2n}$, то з виразу (4.16) попереднього розділу отримаємо рівність

$$K_1 = \gamma^{(1,2)} + \arcsin\left[\frac{V_{2n}}{V_1} \sin(K_2 - \gamma^{(1,2)})\right],$$

аналіз якого показує, що межа області Ω_{KV} існує для швидкостей другого судна, коли вираз під функцією арксинуса $\left|\frac{V_{2n}}{V_1} \sin(K_2 - \gamma^{(1,2)})\right| \leq 1$. Тому макси-

мальне значення курсу першого судна $K_{1\max}$ межі області Ω_{KV} досягається

при швидкості $V_{2m} = \frac{V_1}{\sin(K_2 - \gamma^{(1,2)})}$ і дорівнює:

$$K_{1\max} = \gamma^{(1,2)} \mp \arcsin(1) = \gamma^{(1,2)} \mp \frac{\pi}{2}.$$

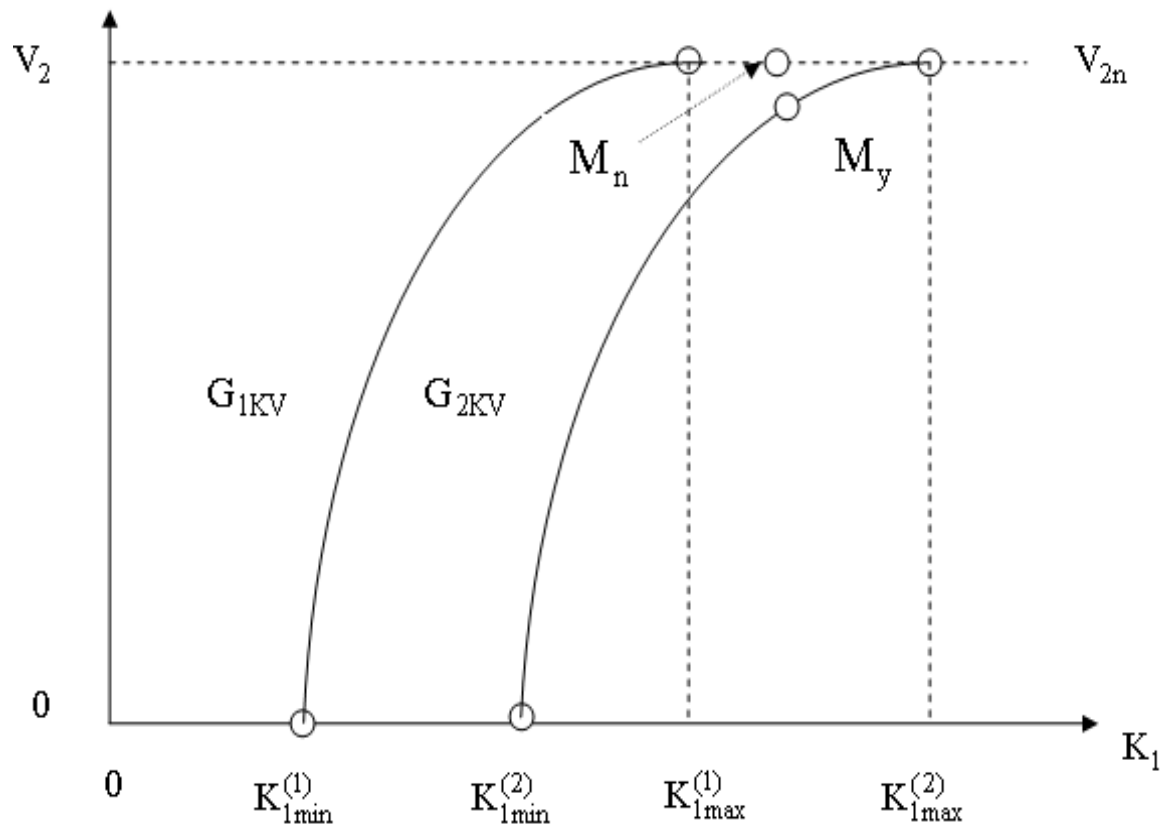


Рис. 4.29. Область Ω_{KV} небезпечних параметрів суден

Отже,

$$K_{1\max}^{(1)} = \gamma^{(1)} - \frac{\pi}{2}, \quad K_{1\max}^{(2)} = \gamma^{(2)} + \frac{\pi}{2}.$$

Таким образом, при $V_1 < V_{2n}$ межі області Ω_{KV} існують для

$$K_1 \in [\gamma^{(1,2)} - \frac{\pi}{2}, \gamma^{(1,2)} + \frac{\pi}{2}] \text{ та } V_2 \in [0, \frac{V_1}{\sin(K_2 - \gamma^{(1,2)})}].$$

Для формування області Ω_{KV} та її графічного відображення розроблена комп'ютерна програма, де враховується співвідношення початкових швидкостей суден V_1 та V_{2n} .

В разі $V_1 > V_{2n}$ існують значення $K_1(V_2^{(1,2)} = V_{2n})$ для обох меж, а область Ω_{KV} небезпечних параметрів курсу одного судна і швидкості другого судна, укладена між першою і другою межами має вигляд так, як показано на рис. 4.30. Причому на рис. 4.30 область Ω_{KV} сформована для ситуації небезпечного зближення суден з параметрами: $\alpha=130^\circ$, $D=3$ милі, $K_1=130^\circ$, $V_1=22$ вузли, $K_2=315^\circ$, $V_2=18$ вузлів, $d_d=1$ миля.

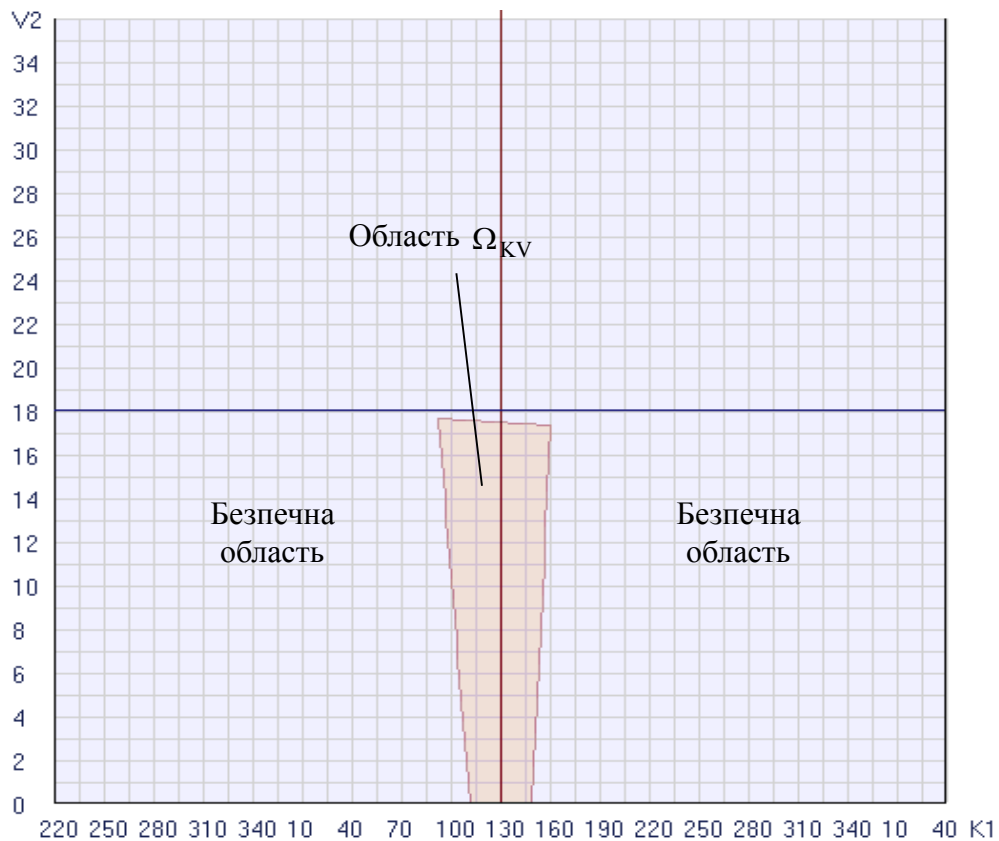


Рис. 4.30. Область Ω_{KV} небезпечних параметрів руху суден при $V_1 > V_{2n}$

Якщо швидкість другого судна перевищує швидкість першого, тобто $V_1 < V_{2n}$, то область Ω_{KV} показана на рис. 4.31. Параметри ситуації небезпе-

чного зближення відрізняються тільки швидкостями суден, причому $V_1=18$ вузлів, а $V_2=22$ вузли.

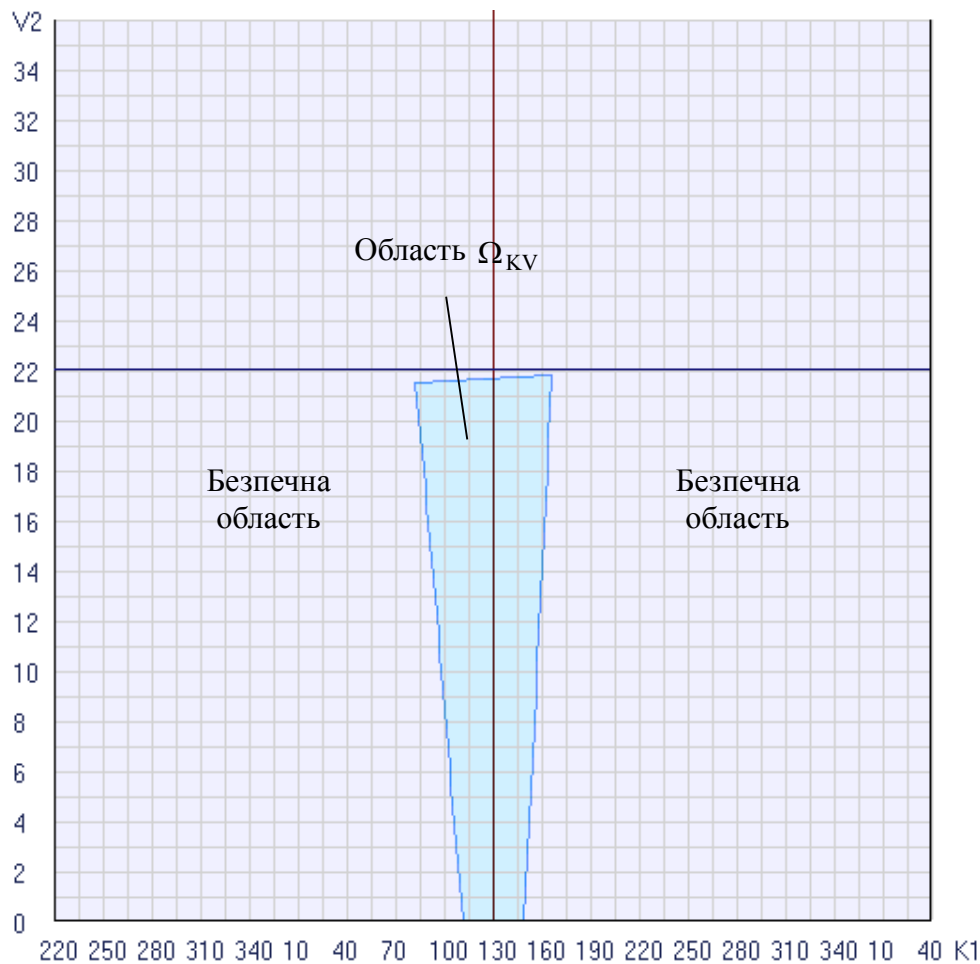


Рис. 4.31. Область Ω_{KV} небезпечних параметрів руху суден при $V_1 < V_{2n}$

Врахування інерційності повороту першого судна і інерційно-гальмівних характеристик другого судна при формуванні меж області Ω_{KV} передбачає визначення для кожного курсу K_{1y} першого судна швидкості гальмування другого судна V_{2y} , при якій судна розійдуться на дистанції найкоротшого зближення $D_{\min}$ рівній гранично допустимій дистанції d_d . При розрахунку швидкості гальмування другого судна передбачається зниження його швидкості до значення V_{2y} , і слідування зниженою швидкістю до моменту часу най-

коротшого зближення. Потім друге судно збільшує швидкість до початкового значення.

Більш детально це питання розглянемо в наступному розділі, присвяченому врахуванню динаміки судна при формуванні розглянутих типів областей неприпустимих параметрів руху суден.

4.4. Висновки за четвертим розділом

У розділі запропоновані аналітичні методи попередження зіткнення суден, в яких використовується домен круглої форми. Отримано аналітичні вирази меж трьох типів областей неприпустимих параметрів.

Наведено метод формування області неприпустимих значень курсів елементарної групи суден, який враховує співвідношення швидкостей суден групи.

Отримано спосіб розрахунку меж області неприпустимих значень швидкостей елементарної групи суден і запропонований аналітичний спосіб розрахунку оптимального маневру розходження, а також розроблені два способи використання комп'ютерних процедур для цієї мети.

Запропоновано спосіб формування і застосування області неприпустимих значень курсів одного судна і швидкостей другого судна, для якого суттєве співвідношення швидкостей суден, що зближуються.

Розроблено комп'ютерні процедури формування та графічного відображення всіх типів областей, показано їх використання для вибору безпечної стратегії розходження зміною параметрів руху обох суден.

Матеріали розділу опубліковано в роботах [6, 12, 14, 17, 19, 24, 29, 32, 34, 37, 39, 44, 51, 54, 56, 58, 59, 61].

РОЗДІЛ 5.

ВРАХУВАННЯ ДИНАМІКИ СУДЕН І НАВІГАЦІЙНИХ НЕБЕЗПЕК ПРИ
ФОРМУВАННІ ОБЛАСТЕЙ НЕПРИПУСТИМИХ ЗНАЧЕНЬ
ЇХ ПАРАМЕТРІВ РУХУ

У попередньому розділі розрахунок меж і формування областей неприпустимих значень параметрів руху елементарної групи суден проводився без врахування інерційності суден і за умови відсутності навігаційних небезпек в районі їх зближення. У цій главі при формуванні областей неприпустимих значень параметрів руху будемо враховувати інерційність суден при зміні курсів і їх інерційно-гальмівні характеристики при зниженні швидкостей.

5.1. Формування області неприпустимих значень курсів суден елементарної групи із врахуванням їх інерційності при зміні курсів

Без врахування інерційних властивостей судна при повороті дистанція найкоротшого зближення буде менше гранично допустимої дистанції D_d на величину ΔD_d . Її залежність від динамічних моделей обертального руху судна показана в Додатку Б.

Для прикладу зробимо чисельну оцінку значень приросту гранично допустимої дистанції зближення $\Delta D_d^{(1)}$, $\Delta D_d^{(2)}$ та $\Delta D_d^{(3)}$ для розглянутих в додатку моделей обертального руху судна в разі маневру зміною курсу тільки одним судном, а друге, відповідно, - зберігає незмінні параметри руху. В цьому випадку приріст координат Δx_2 та Δy_2 прямолінійного руху другого судна виражаються наступним чином:

$$\Delta x_2 = V_2 \tau \sin K_2, \quad \Delta y_2 = V_2 \tau \cos K_2,$$

де τ тривалість повороту першого судна.

Очевидно, приріст відносних координат оцінюється за допомогою виразів:

$$\begin{aligned}\Delta x_{ot} &= \Delta x_1 - V_2 \tau \sin K_2; \\ \Delta y_{ot} &= \Delta y_1 - V_2 \tau \cos K_2.\end{aligned}\quad (5.1)$$

Для розглянутого прикладу використаємо характеристики повороткості балкера «Sheila Ann» при перекладці пера керма на 10° , отриманих натурними спостереженнями в реальних умовах експлуатації [36]: $\omega_p = a_\omega = 0,5422$ градус/с, $T_1 = 19$ с, $T_2 = 2,3$ с. Розглянута наступна ситуація небезпечного зближення: $K_1 = 45^\circ$, $V_1 = 15$ вузлів, $K_2 = 315^\circ$, $V_2 = 20$ вузлів, $\alpha = 100^\circ$, $D = 3$ милі, $D_d = 1$ миля. В даній ситуації прогнозована дистанція найкоротшого зближення $D_{min} = 0,1$ милі, яка із зазначеними параметрами показана на рис. 5.1.

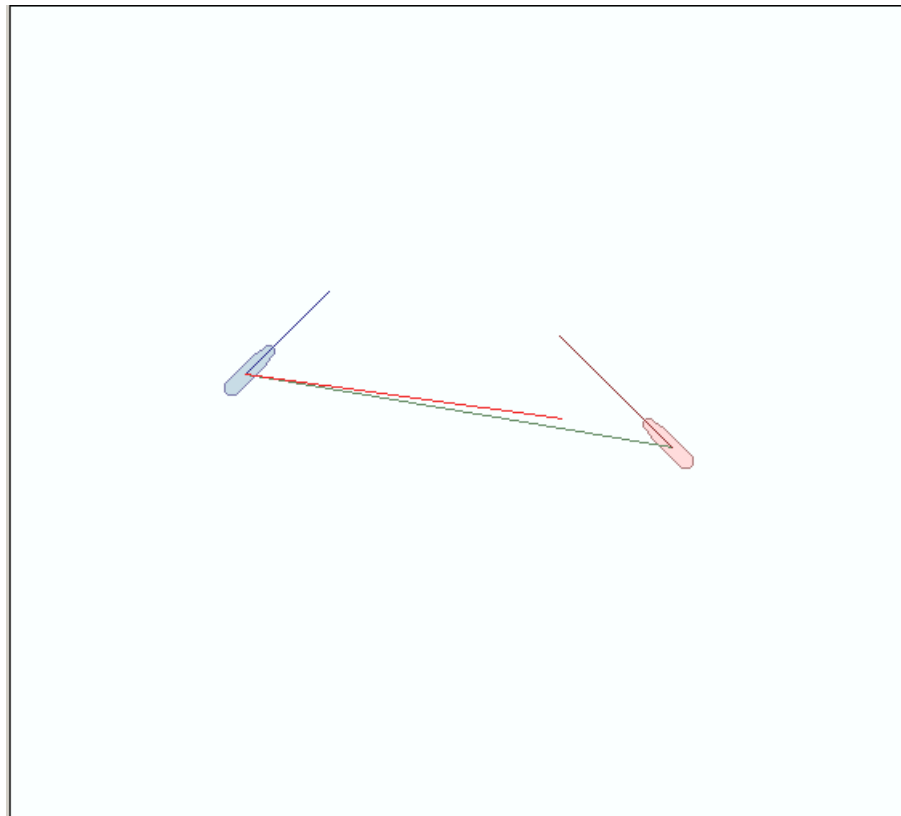


Рис. 5.1. Ситуація небезпечного зближення суден

Для визначення безпечного курсу ухилення з використанням області небезпечних курсів S_{Dij} , яка показана на рис. 5.2, значення курсу першого судна повинно збільшитися від значення $K_1 = 45^\circ$ до точки перетину прямої, що відповідає курсу другого судна $K_2 = 315^\circ$ та з верхньою межею області небезпечних курсів S_{Dij} . Як видно з рис. 5.2 курс ухилення для першого судна $K_{1y} = 98^\circ$.

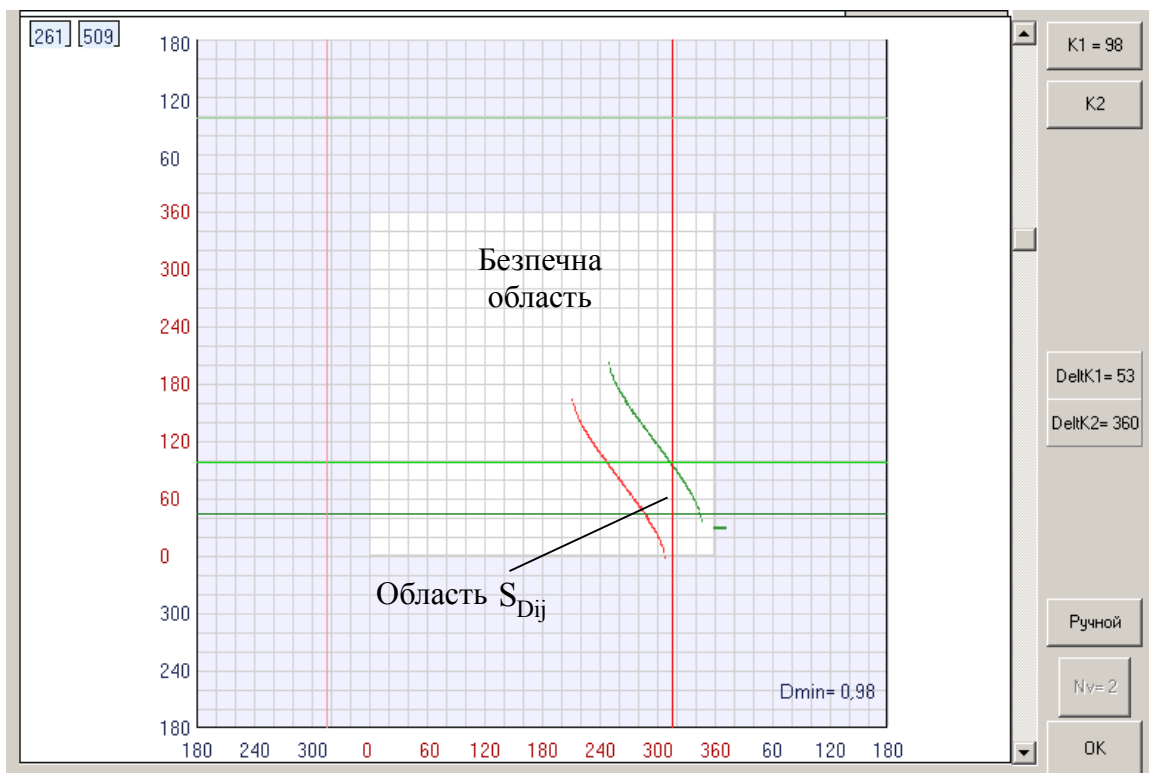


Рис. 5.2. Вибір курсу ухилення K_{1y} першим судном

В разі використання моделі обертального руху судна з постійною кутовою швидкістю знайдемо приріст $\Delta D_d^{(1)}$. Для цього скористаємося виразом [84]:

$$\Delta x_1 = \frac{V_1}{a_\omega} (\cos K_{10} - \cos K_{1y}); \quad \Delta y_1 = \frac{V_1}{a_\omega} (\sin K_{1y} - \sin K_{10})$$

Для розрахунку приросту координат першого судна Δx_1 та Δy_1 , а при-

ріст відносних координат (5.1) із врахуванням $\tau = \frac{K_{1y} - K_1}{\omega_p}$ приймає вигляд:

$$\Delta x_{ot} = \frac{V_1}{\omega_p} (\cos K_1 - \cos K_{1y}) - V_2 \left(\frac{K_{1y} - K_1}{\omega_p} \right) \sin K_2;$$

$$\Delta y_{ot} = \frac{V_1}{\omega_p} (\sin K_{1y} - \sin K_1) - V_2 \left(\frac{K_{1y} - K_1}{\omega_p} \right) \cos K_2.$$

Тривалість повороту склала $\tau = 99,6$ с, приріст координат першого судна Δx_1 та Δy_1 за цей час і другого судна Δx_2 та Δy_2 :

$$\Delta x_1 = 703,6 \text{ м}, \Delta y_1 = 228,7 \text{ м}, \Delta x_2 = -724,3 \text{ м}, \Delta y_2 = 723,7 \text{ м},$$

отже: $\Delta x_{ot} = 1427,9$ м, $\Delta y_{ot} = -495,0$ м, а також $MN = 1511,2$ м, $\psi = -70,9^\circ$ та $\Delta D_d^{(1)} = 0,154$ милі.

У випадку врахування інерційності судна при повороті першою моделлю обертального руху та в результаті розрахунку за відповідними формулами отримали тривалість першої та другої фаз повороту $\tau_1 = 112,7$ с та $\tau_2 = 13,1$ с відповідно, приріст координат першого судна $\Delta x_1 = 871,3$ м та $\Delta y_1 = 313,3$ м, другого $-\Delta x_2 = -915,4$ м та $\Delta y_2 = 914,3$ м. Тому $\Delta x_{ot} = 1786,7$ м, $\Delta y_{ot} = -601,4$ м, $MN = 1885,2$ м, $\psi = -71,4^\circ$ та $\Delta D_d^{(2)} = 0,201$ милі.

У разі оцінки приросту $\Delta D_d^{(3)}$ з використанням другої моделі обертального руху з врахуванням інерційності при повороті, була розрахована, як показано в Додатку Б, тривалість обох фаз повороту судна. Для розрахунку приросту координат першого судна Δx_1 та Δy_1 використовуються відповідні формули для курсів на першій та другій фазах повороту. В результаті маємо тривалість першої і другої фаз повороту $\tau_1 = 115,2$ с та $\tau_2 = 13,2$ с, для першого судна приріст координат $\Delta x_1 = 881,6$ м та $\Delta y_1 = 325,4$ м, для другого судна $\Delta x_2 = -934,1$ м, $\Delta y_2 = 933,4$ м відповідно. Отже, приріст відносних координат

нат $\Delta x_{ot} = 1815,7$ м та $\Delta y_{ot} = -608,0$ м. Остаточного отримано $MN = 1914,8$ м, $\psi = -71,5^\circ$ та $\Delta D_d^{(2)} = 0,206$ милі.

Таким чином, при знаходженні меж області небезпечних курсів S_{Dij} вибір маневру курсом ухилення судна K_{1y} , дає положення точки (K_{1y}, K_2) на межі області S_{Dij} , але забезпечить меншу дистанцію замість очікуваної в 1 милі. Як видно з прикладу, дистанція складе 0,846 милі, а при більш коректному врахуванні інерційності судна при повороті за допомогою другої моделі обертального руху дистанція зближення буде дорівнювати 0,794 милі. Тому при розрахунках меж області небезпечних курсів S_{Dij} належить гранично допустимі дистанцію зближення збільшити на величину $\Delta D_d^{(3)}$. Так в наведеному прикладі при визначенні меж області небезпечних курсів слід задати D_d рівній 1,206 милі замість 1 миля. Це забезпечить, відповідно, найкоротше зближення на дистанції 1 миля при використанні області S_{Dij} . Звертаємо увагу, що значення $\Delta D_d^{(2)}$ та $\Delta D_d^{(3)}$, розраховані з використанням першої і другої моделей обертального руху судна, які враховують інерційність при повороті. Для наведеного прикладу дистанція відрізняється на 0,005 милі або 9 метрів. З чого виходить, що для врахування інерційності судна при повороті досить застосування першої моделі обертального руху.

Розглянемо процедуру врахування інерційності судна в процесі обертального руху при формуванні області небезпечних курсів S_{Dij} .

При розрахунку меж області небезпечних курсів S_{Dij} без врахування інерційності суден використовувалася залежність:

$$K_i = \gamma_{ij} + \arcsin \{ \rho_{ij} [\sin(K_j - \gamma_{ij})] \}, \quad (5.2)$$

в якій прийнято $\gamma_{ij} = \alpha_{ij} - \arcsin \frac{D_d}{\Delta_{ij} D_{ij}}$.

Тому вираз (5.2) приймає наступний вигляд:

$$K_i = \alpha_{ij} - \arcsin \frac{D_d}{\Delta_{ij} D_{ij}} + \arcsin \{ \rho_{ij} [\sin(K_j - \alpha_{ij} - \arcsin \frac{D_d}{\Delta_{ij} D_{ij}})] \}. \quad (5.3)$$

Із врахуванням інерційності суден при повороті для формування області небезпечних курсів S_{Dij} в відповідних рівняннях меж необхідно гранично допустимому дистанцію D_d збільшити на величину приросту дистанції ΔD_d , отже рівняння (5.3) буде мати наступний вигляд:

$$K_{iy} = \alpha_{ij} - \arcsin \frac{D_d + \Delta D_d}{\Delta_{ij} D_{ij}} + \arcsin \{ \rho_{ij} [\sin(K_{jy} - \alpha_{ij} - \arcsin \frac{D_d + \Delta D_d}{\Delta_{ij} D_{ij}})] \}. \quad (5.4)$$

Розглянемо врахування інерційності при повороті суден для випадку $V_1 > V_2$. Оцінку безпеки зближення, як і вибір курсів ухилення здійснюємо за допомогою області S_{Dij} , побудованої тільки із врахуванням гранично допустимої дистанції D_d без врахування інерційності. Для точки межі області з координатою K_{iy} , отриманою за заданою координатою K_{jy} розрахованою за виразом (5.3), знаходимо приріст курсів суден щодо початкових їх значень $\Delta K_i = K_{iy} - K_{io}$ та $\Delta K_j = K_{jy} - K_{jo}$, за ними визначаємо приріст координат Δx_1 , Δy_1 , Δx_2 та Δy_2 для обох суден за час поворотів із врахуванням динамічної моделі їх обертального руху. Далі розраховується приріст відносних координат Δx_{ot} , Δy_{ot} і обчислюється перше наближення $\Delta D_d^{(1)}$ значення шуканого приросту дистанції ΔD_d . Розраховане $\Delta D_d^{(1)}$ підставляємо в формулу (5.4) і отримуємо уточнене значення $K_{iy}^{(1)}$. Знаходимо приріст координати

$\Delta K_i^{(1)} = K_{iy}^{(1)} - K_{io}$ та за описаним алгоритмом знаходимо друге наближення $\Delta D_d^{(2)}$. Маємо на увазі, що при розрахунку відносного курсу ухилення K_{oty}^* замість гранично допустимої дистанції D_d беремо суму $D_d + \Delta D_d^{(1)}$. Зазначена процедура послідовних наближень проводиться до того часу, поки різниця приростів $\Delta D_d^{(n)} - \Delta D_d^{(n-1)}$ не дорівнюватиме або стане менше заданої величини δD . Після цього для даної точки межі області S_{Dij} розраховується координата $K_{iy} = K_{iy}^{(n)}$, відповідна гранично допустимій дистанції $D_d + \Delta D_d^{(n)}$. Таким образом розраховуються всі точки межі області небезпечних курсів S_{Dij} .

Для розрахунку меж області S_{Dij} із врахуванням інерційності суден при повороті була розроблена комп'ютерна програма, де реалізується алгоритм, представлений на рис. 5.3. У програмі приріст координат суден при повороті проводиться з використанням першої моделі обертального руху. Розрахунок координат окремої точки межі області S_{Dij} показаний в алгоритмі. У випадку, коли швидкість першого судна менше швидкості другого ($V_1 < V_2$), межі області небезпечних курсів S_{Dij} розраховуються тільки для курсів K_2 , де виконується нерівність:

$$\frac{V_2}{V_1} [\sin(K_2 - \alpha_{12} - \arcsin \frac{D_d + \Delta D_d}{\Delta_{12} D_{12}})] \leq 1.$$

Якщо швидкість першого судна більша від швидкості другого ($V_1 > V_2$), то курс другого судна K_2 , як незалежної змінної, приймає значення в діапазоні 0 - 360 градусів. Для обох випадків $V_1 < V_2$ та $V_1 > V_2$ курс першого судна K_1 , як функція, визначається за формулою (5.4).

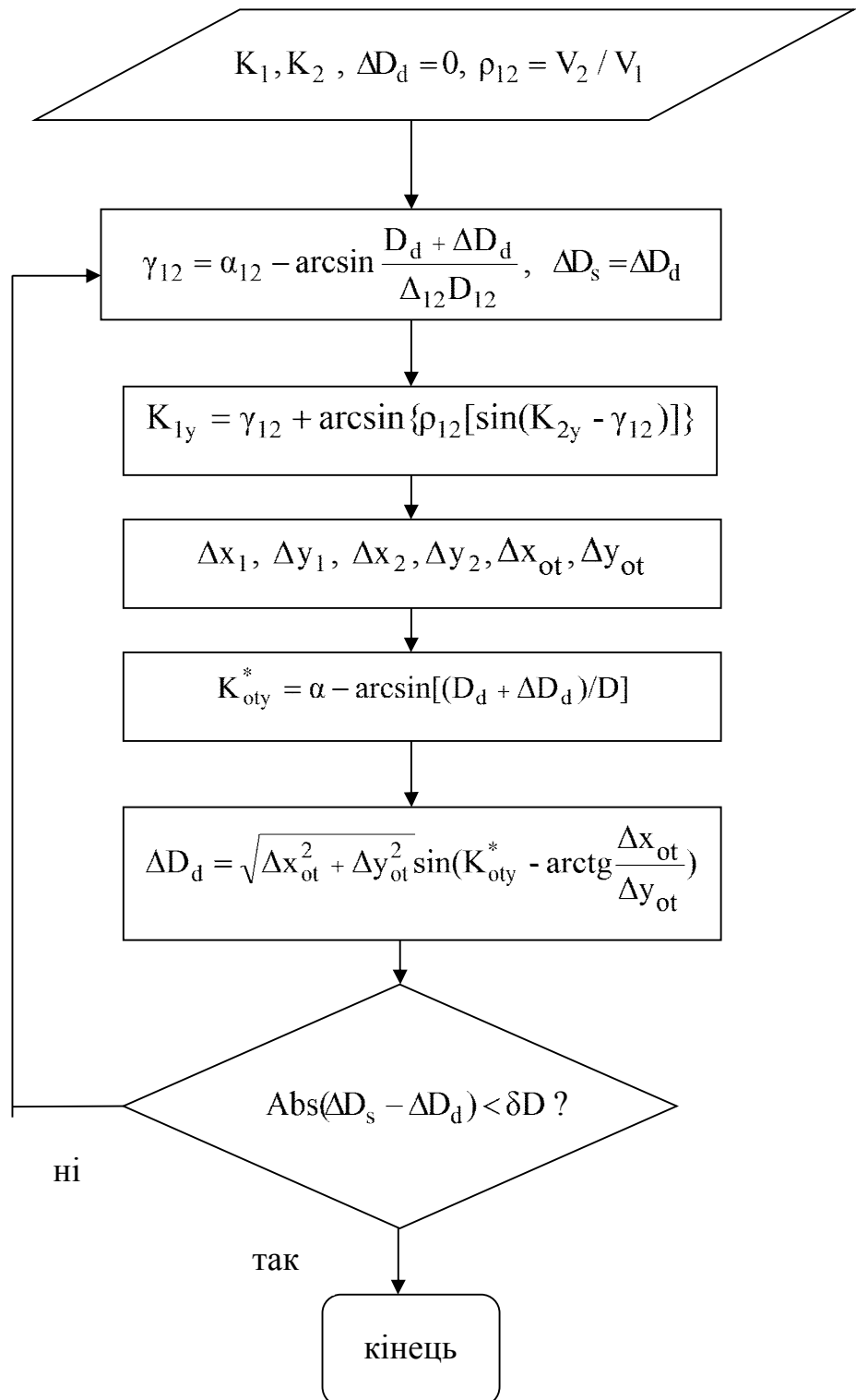


Рис. 5.3. Алгоритм розрахунку точки межі області S_{Dij}

В окремому випадку, коли швидкості обох суден однакові $V_1 = V_2$ розрахунок курсу першого судна виконується за допомогою залежності:

$$K_1 = \pi + 2[\alpha_{12} - \arcsin(\frac{D_d + \Delta D_d}{\Delta_{12} D_{12}})] - K_2.$$

З використанням розробленої комп'ютерної програми була згенерована ситуація небезпечного зближення суден для випадку $V_1 > V_2$, яка показана на рис. 5.4. Її параметрами є: відносна позиція зближення $\alpha_{12} = 158^\circ$, $D_{12} = 2,0$ милі та параметри руху обох суден $K_1 = 117^\circ$, $V_1 = 23$ вузли, $K_2 = 58^\circ$, $V_2 = 14$ вузлів. Значення гранично допустимої дистанції зближення суден D_d дорівнює 1 милі. Прогнозоване значення дистанції найкоротшого зближення в даній ситуації дорівнює 0,16 милі, що менше величини D_d .

Межі області небезпечних курсів із врахуванням інерційності суден і без врахування представлені на рис. 5.5. У даній ситуації межі області небезпечних курсів при врахуванні інерційності суден та без врахування її значно відрізняються. Без врахування інерційності для безпечного маневру достатньо було б змінити курс другого судна вліво на $K_{2y} = 321^\circ$, без зміни курсу першого судна. У даному випадку відповідна вертикальна темна лінія проходить через червону нижню межу області небезпечних курсів та перетинається з горизонтальною лінією початкового курсу першого судна $K_1 = 117^\circ$. Однак, нижня межа області небезпечних курсів із врахуванням інерційності суден синього кольору проходить значно нижче. А для безпечного маневру необхідно ще й ухилення першого судна вліво на курс $K_{1y} = 84^\circ$ (нижня горизонтальна темна лінія).

Очевидно, для безпечного розходження суден із врахуванням їх інерційності на допустимій дистанції $D_d = 1$ миля суднам слід змінити курси на курси ухилення $K_{1y} = 84^\circ$ та $K_{2y} = 321^\circ$.

Приклад вибору безпечного маневру розходження зміною курсів обох суден із врахуванням їх динаміки приведено в Додатку Б.

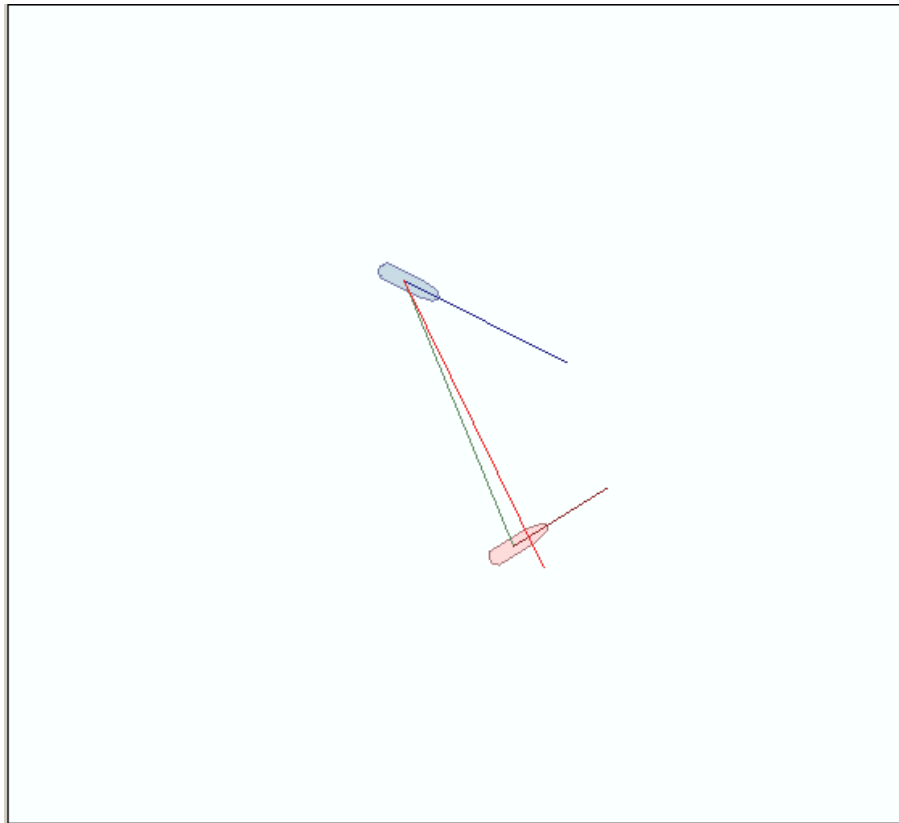


Рис. 5.4. Ситуація небезпечного зближення при $V_1 > V_2$

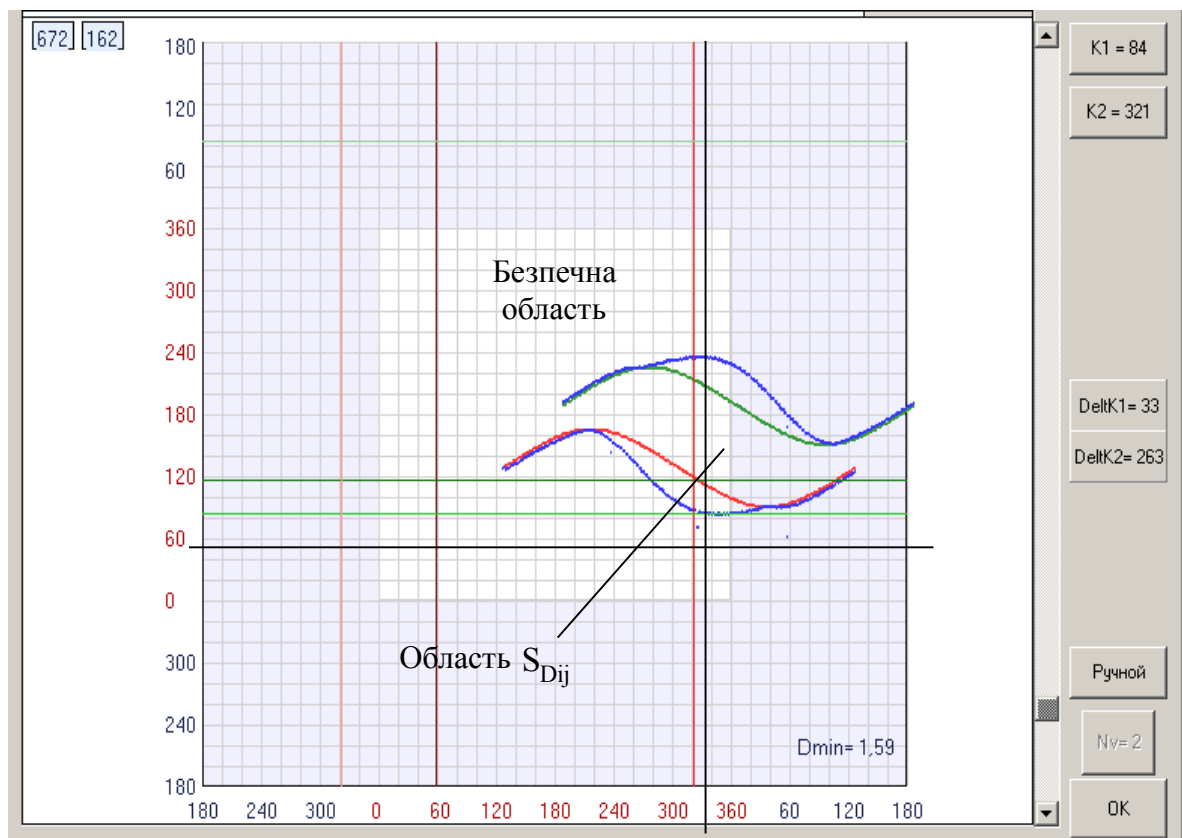


Рис. 5.5. Межі області S_{Dij} другої ситуації зближення при $V_1 > V_2$

5.2. Врахування інерційно-гальмівних характеристик суден елементарної групи при формуванні областей неприпустимих значень параметрів їх руху при зміні швидкості

Якби маневр суден зменшенням їх швидкостей характеризувався короткочасними перехідними процесами, то визначення швидкостей V_{1y} та V_{2y} можна було б проводити за допомогою області небезпечних значень швидкостей Ω_v , як показано в попередньому розділі. Однак зниження швидкості суден гальмуванням вимагає значного часу, тому при виборі маневру зниженням швидкостей суден слід враховувати їх інерційно-гальмівні характеристики.

Для вибору безпечного маневру при його зовнішньому управлінні гальмуванням обох суден слід в початковий момент часу $t_n = 0$ почати гальмування обох суден (активне або пасивне) до швидкостей V_{1y} та V_{2y} , які необхідно визначити і вони повинні мінімально відрізнятися від початкових значень відповідних швидкостей V_1 , V_2 .

Причому для швидкостей V_{1y} та V_{2y} повинна досягатися рівність дистанції найкоротшого зближення $D_{\min}(V_{1y}, V_{2y})$ з гранично допустимою дистанцією зближення D_d , тобто $D_{\min}(V_{1y}, V_{2y}) = D_d$, до моменту часу закінчення перехідного процесу, що збігається з моментом часу найкоротшого зближення.

Очевидно, що значення швидкостей V_{1y} та V_{2y} є меншими, ніж їх початкові величини V_1 та V_2 , тобто судна змінюють швидкість гальмуванням. Зі зниженими швидкостями судна слідує до моменту часу найкоротшого зближення, а потім збільшують швидкості і повертаються до їх початкових значень.

Припустимо, що ситуація небезпечного зближення суден в початковий моменту часу $t_0 = 0$ характеризується пеленгом α_0 і дистанцією D_0 . Оскільки

ки пеленг α_0 задається з першого судна на друге, то для першого судна доцільно прийняти наступні початкові координати $X_{10} = 0$ та $Y_{10} = 0$. Зрозуміло, що початкові координати другого судна будуть мати значення $X_{20} = D_0 \sin \alpha_0$ та $Y_{20} = D_0 \cos \alpha_0$.

З плином часу координати суден X_{1t} , Y_{1t} , X_{2t} , Y_{2t} та поточні значення дистанції D_t і пеленга α_t будуть змінюватися. Позначимо через s_{mx} судно, перехідний період зміни швидкості якого більше або дорівнює тривалості загального перехідного процесу t_p . Судно яке має менший перехідний період позначимо s_{mn} . Якщо час початку маневру t_n дорівнює початковому моменту часу t_0 , то дистанції, які проходять судна протягом перехідного процесу t_p визначаються виразом:

$$L_{mx} = S_{mx}, L_{mn} = S_{mn} + V_{mny}(t_p - \tau_{mn}),$$

де S_{mx} та S_{mn} – відстані, які проходять судна s_{mx} та s_{mn} за час перехідного процесу зміни швидкостей τ_{mx} та τ_{mn} відповідно.

До моменту часу закінчення загального перехідного процесу t_p координати суден X_{mxp} , Y_{mxp} , X_{mnp} та Y_{mnp} визначаються наступними формулами:

$$X_{mxp} = L_{mx} \sin K_{mx} = S_{mx} \sin K_{mx};$$

$$Y_{mxp} = L_{mx} \cos K_{mx} = S_{mx} \cos K_{mx};$$

$$X_{mnp} = L_{mn} \sin K_{mn} = [S_{mn} + V_{mny}(t_p - \tau_{mn})] \sin K_{mn};$$

$$Y_{mnp} = L_{mn} \cos K_{mn} = [S_{mn} + V_{mny}(t_p - \tau_{mn})] \cos K_{mn}.$$

Вирази пеленга α_p і дистанції D_p на момент часу t_p :

$$D_p = \sqrt{(X_{\text{mxp}} - X_{\text{mnp}})^2 + (Y_{\text{mxp}} - Y_{\text{mnp}})^2},$$

$$\alpha_p = \arcsin \frac{X_{\text{mxp}} - X_{\text{mnp}}}{D_p}.$$

У момент часу закінчення перехідного процесу t_p параметри руху обох суден, як і відносний курс $K_{\text{отр}}$, стають незмінними. Тому величина дистанції найкоротшого зближення суден D_{min} розраховується за допомогою формули:

$$D_{\text{min}} = \Delta_p D_p \sin(K_{\text{отр}} - \alpha_p),$$

де $\Delta_p = \text{sign}[\sin(K_{\text{отр}} - \alpha_p)]$.

Задаючись значенням однієї з швидкостей V_{1y} , знаходимо значення другої швидкості V_{2y} , при якій отримане значення D_{min} дорівнює величині D_d . Якщо ж $D_{\text{min}}(V_{1y}, V_{2y}) < D_d$, то безпечна швидкість V_{1y} неможлива.

В Додатку Б розглянуто всі варіанти вибору режиму гальмування при виконанні маневру розходження зміною швидкостей пари суден, враховуючи, що кожне із суден може застосувати активне або пасивне гальмування.

Для формування області Ω_{KVf} небезпечних курсів одного судна і швидкостей другого із врахуванням інерційно-гальмівних характеристик була розроблена комп'ютерна програма, яка реалізує запропонований в роботі алгоритм розрахунку межі області.

Як приклад було розглянуто ситуацію небезпечного зближення суден з параметрами: $\alpha = 130^\circ$, $D = 3$ милі, $K_1 = 130^\circ$, $V_1 = 22$ вузли, $K_2 = 315^\circ$, $V_2 = 18$ вузлів, $D_d = 1$ миля, а графічне зображення представлено на рис. 5.6. Прогнозоване значення дистанції найкоротшого зближення дорівнює $D_{\text{min}} = 0,1$ милі, що свідчить про небезпечне зближення суден.

Для наведеної ситуації небезпечного зближення суден на рис. 5.7 показана область Ω_{KVf} при зниженні швидкості другого судна пасивним гальму-

ванням. Поєднання параметрів суден $K_{1y}^{(s)}$ та V_{2y} на межі області забезпечує потрібну дистанцію найкоротшого зближення $D_{\min f}=1$ миля. На рис. 5.7 обрана стратегія суден з параметрами $K_{1y}^{(s)}=163^\circ$ та $V_{2y}=15,6$ вузла (точка межі показана концентричними колами), які забезпечують найкоротшу дистанцію зближення $D_{\min f}=1,01$ милі.

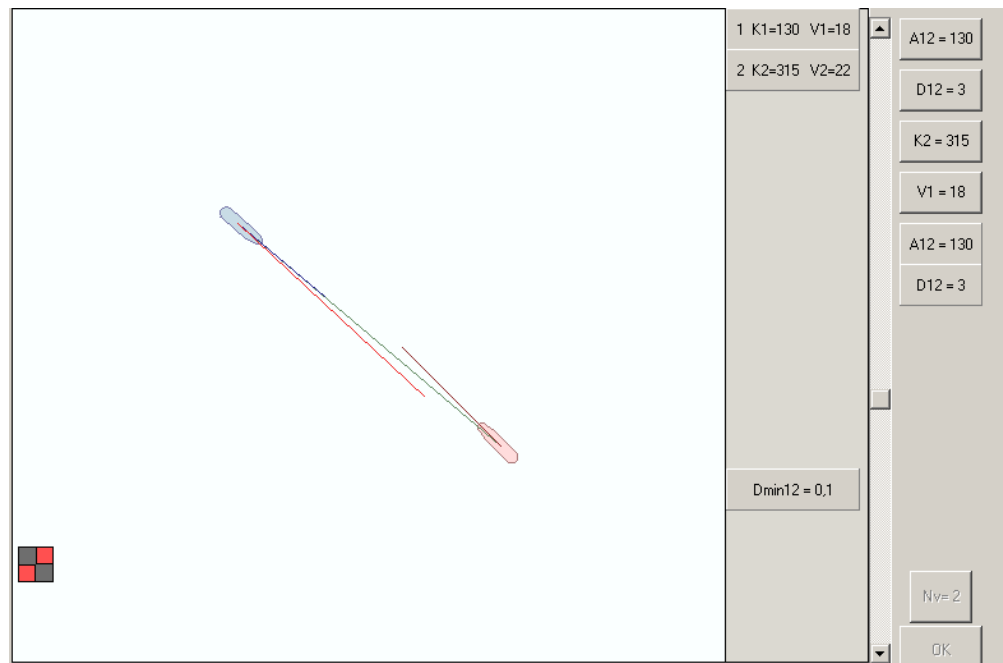


Рис. 5.6. Ситуація небезпечного зближення суден

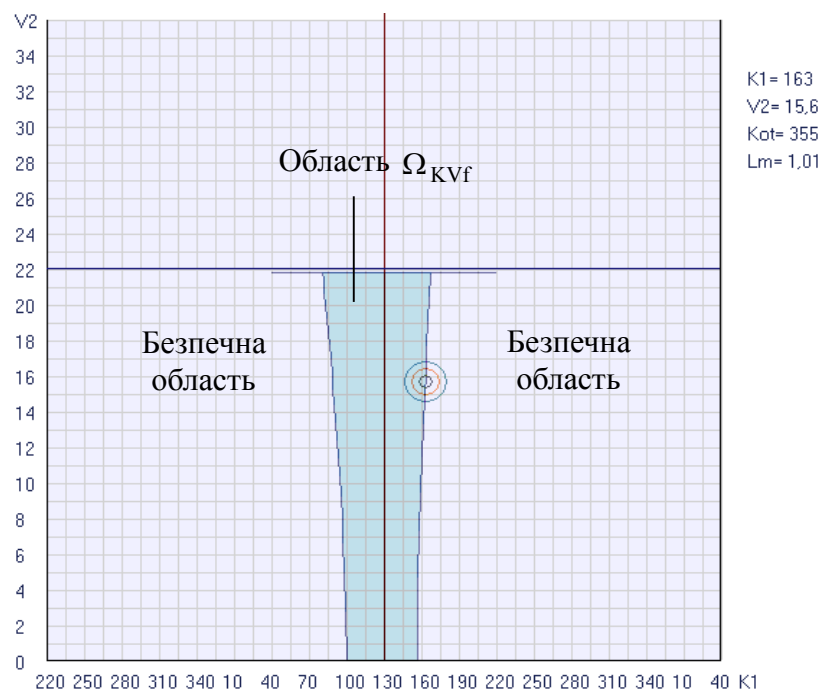


Рис. 5.7. Область Ω_{KVf} при пасивному гальмуванні другого судна

При ухиленні першого судна вправо на 33° для безпечного розходження другому судну потрібно знизити швидкість пасивним гальмуванням на 6,4 вузла.

Для тієї ж ситуації небезпечного зближення програмою була розрахована область Ω_{KVf} при активному гальмуванні другого судна, що показана на рис. 5.8.

На межі області Ω_{KVf} обрана точка, яка відповідає параметрам стратегії суден $K_{1y}^{(p)}=85^\circ$ та $V_{2y}=18,4$ вузла і при яких значення дистанції найкоротшого зближення дорівнює $D_{\min f}=1,00$ милі, а розходження суден, відповідно, стає безпечним.

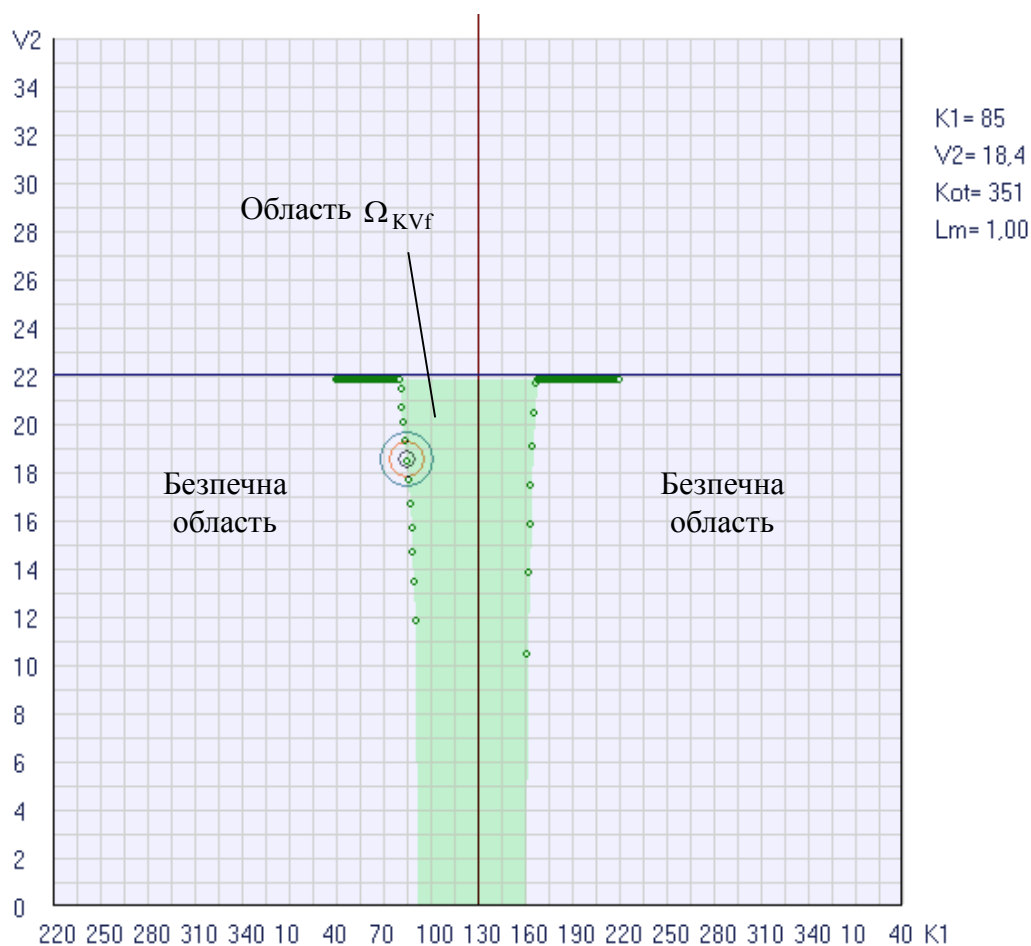


Рис. 5.8. Область Ω_{KVf} при активному гальмуванні другого судна

5.3. Врахування навігаційних небезпек при виборі маневру розходження за допомогою областей неприпустимих значень параметрів руху суден

В роботі [119] показано, що навігаційні небезпеки відносяться до одного з трьох наступних основних типів:

- точкові навігаційні небезпеки, їх розмірами можна знехтувати;
- розподілені лінійні навігаційні небезпеки, їх межа може бути описана прямою лінією;
- складні розподілені навігаційні небезпеки, їх межа має складну форму та описується нелінійними аналітичними залежностями.

Точкова навігаційна небезпека, як правило, обмежується колом, радіус якого дорівнює гранично допустимій дистанції $\hat{l}_n$ найкоротшого зближення. Знайдемо аналітичний вираз для прогнозованої мінімальної дистанції $\min l_n$ між судном і точковою навігаційною ціллю, при заданій початковій відносній позиції l_n , α_n , і з умовою, що судно зберігає параметри свого руху. Поточна відносна позиція судна і цілі задається відносними координатами $\Delta\xi$ та $\Delta\eta$, які описуються наступними виразами (рис. 5.9):

$$\Delta\xi = \Delta\xi_n - \Delta\xi_t; \quad \Delta\eta = \Delta\eta_n - \Delta\eta_t,$$

де $\Delta\xi_n$ та $\Delta\eta_n$ - координати початкової позиції; $\Delta\xi_t$ та $\Delta\eta_t$ - зміна початкових координат.

Поточна дистанція до точкової навігаційної небезпеки l визначиться за відомим рівнянням:

$$l = \sqrt{\Delta\xi^2 + \Delta\eta^2}, \quad (5.5)$$

за допомогою якого знаходимо вираз для мінімального значення $\min l_n$. Для

цього знаходимо першу похідну дистанції l за часом $\frac{\partial l}{\partial t}$ і прирів-

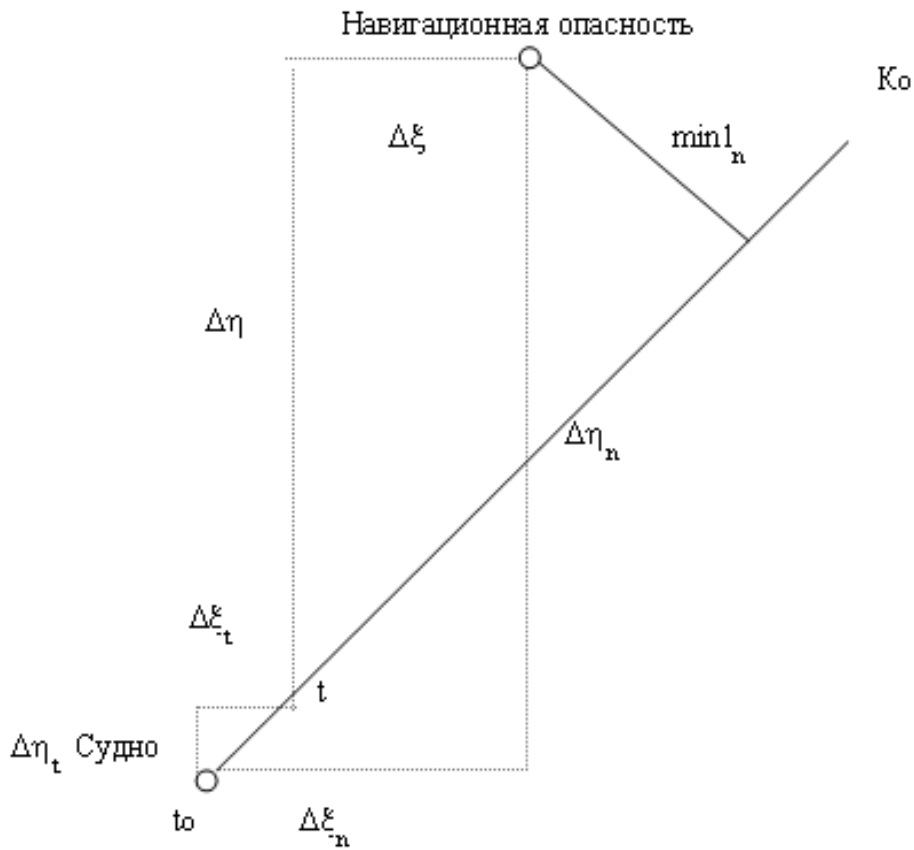


Рис. 5.9. Вивід виразу для мінімальної дистанції $\min l_n$

няти її до нуля. Диференціюючи вираз (5.5) за часом, отримаємо:

$$\frac{\partial l}{\partial t} = \frac{\Delta \xi \Delta \dot{\xi} + \Delta \eta \Delta \dot{\eta}}{l} = 0,$$

або

$$\Delta \xi \Delta \dot{\xi} + \Delta \eta \Delta \dot{\eta} = 0. \quad (5.6)$$

Очевидно, з урахуванням постійних параметрів руху судна K_o та V_o отримаємо:

$$\begin{aligned} \Delta \xi_t &= V_o t \sin K_o, \quad \Delta \eta_t = V_o t \cos K_o, \\ \Delta \xi &= \Delta \xi_n - V_o t \sin K_o, \quad \Delta \eta = \Delta \eta_n - V_o t \cos K_o, \\ \Delta \dot{\xi} &= V_o \sin K_o, \quad \Delta \dot{\eta} = V_o \cos K_o. \end{aligned}$$

Підставляємо отримані вирази в рівняння (5.6):

$$(\Delta\xi_n - V_o t_k \sin K_o) V_o \sin K_o + (\Delta\eta_n - V_o t_k \cos K_o) V_o \cos K_o = 0,$$

звідки

$$t_k = \frac{\Delta\xi_n \sin K_o + \Delta\eta_n \cos K_o}{V_o},$$

або

$$t_k = \frac{l_n \cos(K_o - \alpha_n)}{V_o},$$

де $\Delta\xi_n = l_n \sin \alpha_n$ та $\Delta\eta_n = l_n \cos \alpha_n$.

З урахуванням отриманого виразу для t_k приріст відносних координат $\Delta\xi$ та $\Delta\eta$:

$$\Delta\xi(t_k) = \Delta\xi_n - l_n \sin K_o \cos(K_o - \alpha_n),$$

$$\Delta\eta(t_k) = \Delta\eta_n - l_n \cos K_o \cos(K_o - \alpha_n).$$

Отримані вирази для $\Delta\xi(t_k)$ та $\Delta\eta(t_k)$ підставляємо в (5.5) і знаходимо формулу для розрахунку $\min l_n$:

$$\min l_n = \sqrt{\Delta\xi(t_k)^2 + \Delta\eta(t_k)^2},$$

або після перетворень

$$\min l_n = l_n \sqrt{1 - \cos^2(K_o - \alpha_n)}.$$

Остаточно вираз для $\min l_n$ приймає вигляд:

$$\min l_n = l_n \sin(K_o - \alpha_n).$$

Для безпечного проходження точкової небезпеки необхідна перевага зна-

чення дистанції найкоротшого зближення $\min l_n$ над значенням гранично допустимої дистанції найкоротшого зближення $\hat{l}_n$, тобто:

$$\text{Abs}[l_n \sin(K_y - \alpha_n)] \geq \hat{l}_n. \quad (5.7)$$

За допомогою виразу (5.7) знаходимо граничні безпечні курси ухилення судна з умови $\min l_n = \hat{l}_n$, тому:

$$\text{Abs}[l_n \sin(K_y - \alpha_n)] = \hat{l}_n,$$

звідки граничні курси ухилення судна K_{y*} та K_y^* :

$$K_{y*} = \alpha_n - \arcsin \frac{\hat{l}_n}{l_n}; \quad K_y^* = \alpha_n + \arcsin \frac{\hat{l}_n}{l_n}.$$

Тому безпечними курсами ухилення K_y є такі, що не належать до підмножини $[K_{y*}, K_y^*]$, тобто $K_y \notin [K_{y*}, K_y^*]$, як слідує з рис. 5.10.

Розглянемо наступну ситуацію небезпечного зближення суден, яка показана на рис. 5.11 і характеризується параметрами: відносна позиція зближення $\alpha_{12} = 74^\circ$, $D_{12} = 3,0$ милі і параметрами руху суден $K_1 = 45^\circ$, $V_1 = 15$ вузлів, $K_2 = 315^\circ$, $V_2 = 15$ вузлів, причому $D_d = 1,0$ миля. Прогнозоване значення дистанції найкоротшого зближення становить 0,8 милі. Попереду по курсу руху суден розташована точкова навігаційна небезпека, положення якої відносно першого судна характеризується пеленгом $\alpha_1 = 40^\circ$ і дистанцією $D_1 = 2,6$ милі, а відносно другого судна $\alpha_2 = 313^\circ$ та $D_2 = 1,63$ милі. За положенням точкової навігаційної небезпеки відносно обох суден і $\hat{l}_n = 0,25$ було розраховано граничні безпечні курси ухилення. Наступні граничні безпечні курси $K_{1y*} = 15^\circ$ та $K_{1y}^* = 65^\circ$ були отримані в результаті розрахунку для першого

судна, які показані на рис. 5.11 від лівого першого судна пунктирними лініями. Для другого судна відповідно - $K_{2y*} = 296^\circ$ та $K_{2y}^* = 330^\circ$. Отримані граничні курси характеризують підмножину неприпустимих курсів ухилення для кожного із суден.

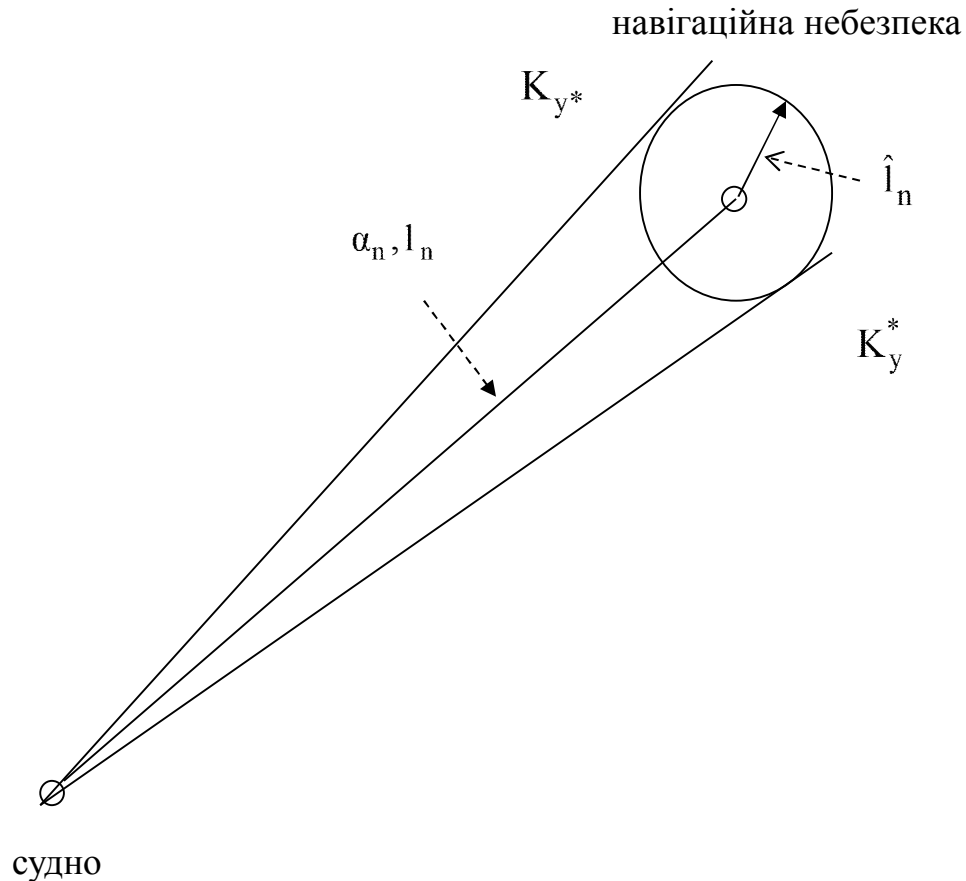


Рис. 5.10. Граничні безпечні курси ухилення K_{y*} та K_y^*

Область небезпечних курсів суден S_{Dij} , для розглянутої ситуації небезпечного зближення, показана на рис. 5.12. Специфічна форма області пояснюється рівністю швидкостей суден, що зближаються. Пунктирними лініями нанесені граничні безпечні курси ухилення на розширену площину курсів суден. При виборі забороняється використовувати курси ухилення, які знаходяться між відповідними граничними значеннями.

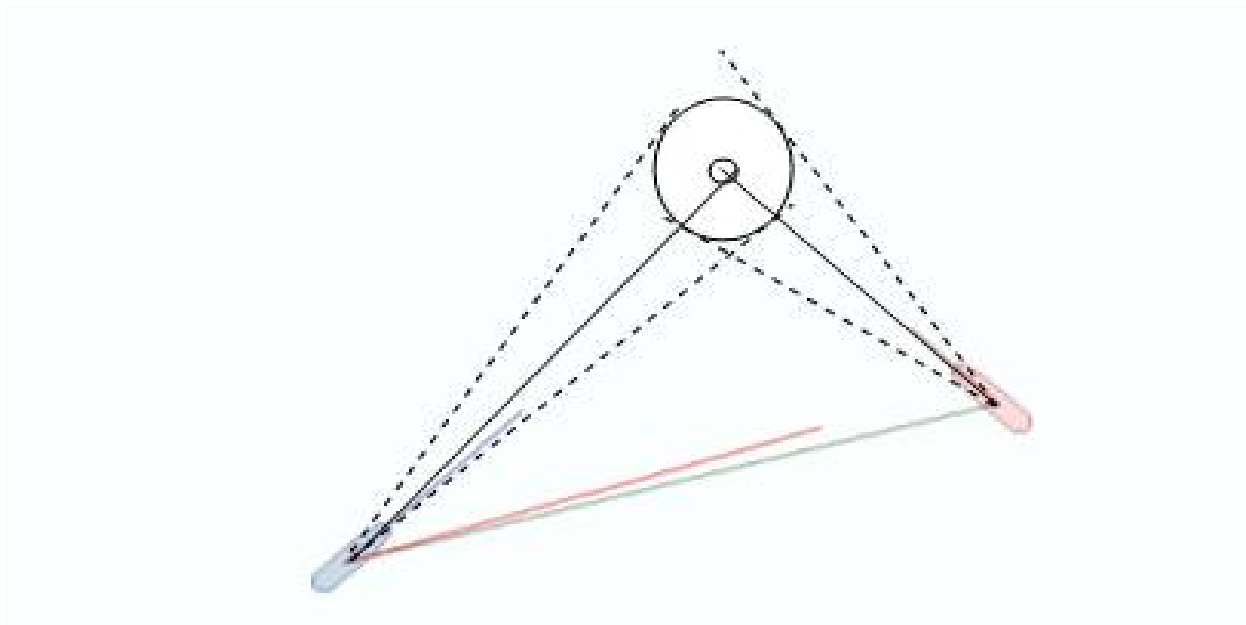


Рис. 5.11. Ситуація зближення при наявності точкової небезпеки

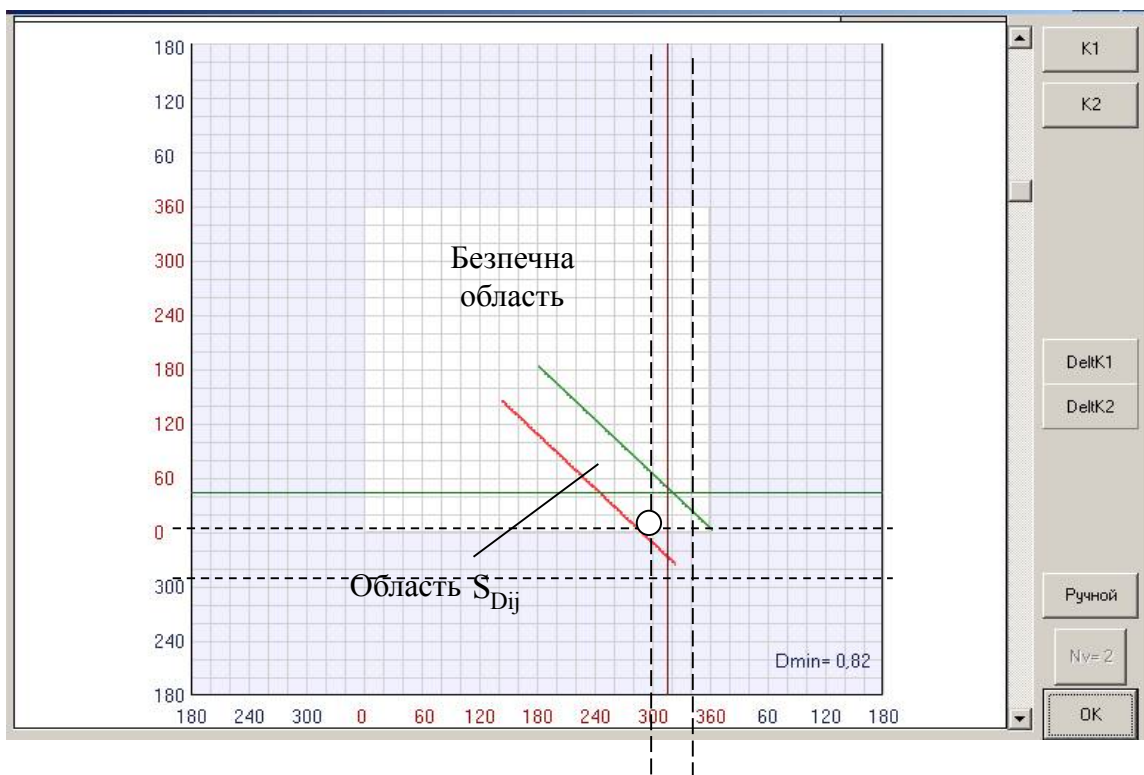


Рис. 5.12. Область небезпечних курсів S_{Dij} із врахуванням точкової небезпеки

У даній ситуації спільний безпечний маневр розходження відповідає точці верхньої межі області S_{Dij} , в якій перетинаються граничні безпечні курси $K_{1y}^* = 65^\circ$ та $K_{2y}^* = 296^\circ$. Значення цих курсів відповідають курсам ухилення для безпечного розходження без ризику зіткнення з навігаційної небезпекою.

Як зазначалося раніше, до другого типу навігаційних небезпек, відносяться розподілені лінійні небезпеки. В першому наближенні геометрично вони представляються прямою лінією. Для формалізації навігаційного обмеження другого типу (розподіленої лінійної небезпеки) необхідно знайти аналітичний вираз для опису її межі. Напрямок лінійної межі навігаційної небезпеки вибирається таким чином, щоб безпечна область завжди знаходилась справа від напрямку її межі. Якщо межа навігаційної небезпеки розташована горизонтально і безпечна область знаходиться під межею, то її напрямок дорівнює куту $\beta = 90^\circ$, а якщо безпечна область знаходиться над межею навігаційної небезпеки, то $\beta = 270^\circ$ відповідно. Дана ситуація показано на рис 5.13. Це правило вибору напрямків лінійної межі навігаційної небезпеки дає можливість отримувати позитивне значення найкоротшої дистанції зближення до межі $\min l_n$, якщо судно знаходиться в безпечній області, і негативне – в іншому випадку.

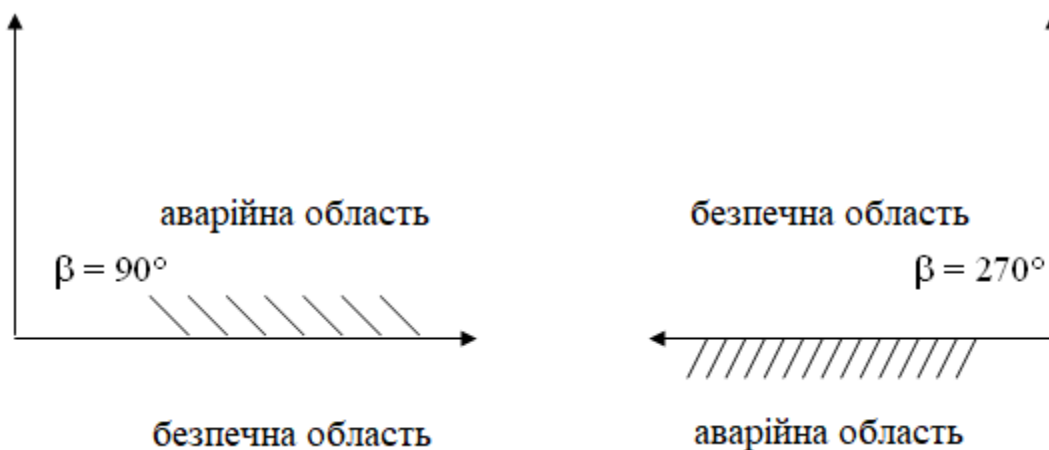


Рис. 5.13. Визначення напрямку лінійної межі небезпеки

У випадку розподіленої лінійної навігаційної небезпеки розглянемо аналітичний вираз для обмежень. Початкове навігаційне обмеження має вигляд $\min l_n \geq \hat{l}_n$, в якому $\hat{l}_n$ - гранична допустима дистанція між судном і межею навігаційної небезпеки. З рис. 5.14 випливає, що $\min l_n$ визначається наступним виразом:

$$\min l_n = l_{kn} - L_t \cos \psi.$$

Кут ψ виражається в такий спосіб:

$$\psi = 2\pi - K_y + \beta - \frac{\pi}{2}; \quad \psi = \beta - K_y + \frac{3\pi}{2},$$

тому

$$\cos \psi = \cos(\beta - K_y + \frac{3\pi}{2}) = \sin(\beta - K_y).$$

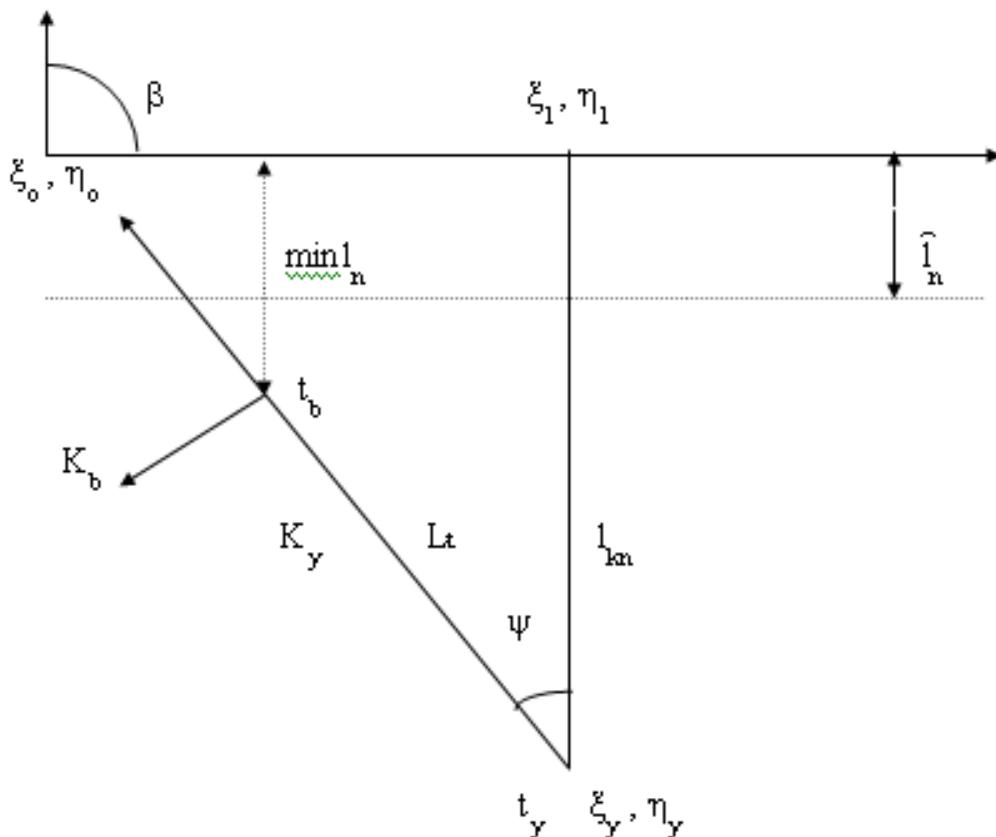


Рис. 5.14. До виводу виразу для $\min l_n$

З рис. 5.14 випливає $L_t = V_o(t_b - t_y)$, де t_y та t_b – відповідно моменти часу початку ухилення і початку повороту в бік програмної траєкторії руху судна. Отже, $\min l_n$ є функцією інтервалу часу $(t_b - t_y)$ і визначається з наступної аналітичної залежності:

$$\min l_n = l_{kn} - V_o(t_b - t_y) \sin(\beta - K_y), \quad (5.8)$$

де l_{kn} – нормальна відстань до навігаційної небезпеки в момент часу t_y .

Для знаходження виразу розрахунку величини l_{kn} координати судна на момент часу початку ухилення t_y позначимо через ξ_y, η_y , координати точки початку межі лінійної навігаційної небезпеки, – через ξ_o, η_o , а координати точки перетину нормалі з межею лінійної небезпеки позначені через ξ_1, η_1 . Позначаємо $\Delta\xi_1 = \xi_1 - \xi_y$, $\Delta\eta_1 = \eta_1 - \eta_y$ і записуємо вираз для l_{kn} :

$$l_{kn} = (\Delta\xi_1^2 + \Delta\eta_1^2)^{1/2}.$$

Координати ξ_y, η_y та ξ_o, η_o відомі, проте координати точки перетину нормалі з межею лінійної навігаційної небезпеки ξ_1, η_1 слід знайти. Точка з координатами ξ_1, η_1 належить одночасно межі навігаційної небезпеки і нормалі до неї. Це вимагає пошуку рівняння межі лінійної навігаційної небезпеки і рівняння нормалі до неї, що проходять через точку з координатами ξ_1, η_1 . Рівняння межі лінійної навігаційної небезпеки:

$$(\eta_1 - \eta_o) \sin \beta = (\xi_1 - \xi_o) \cos \beta.$$

А вираз нормалі до межі навігаційної небезпеки записуємо, як рівняння нормалі до прямої з відомим кутовим коефіцієнтом, що проходить через точку з координатами ξ_y, η_y , тобто:

$$(\eta_1 - \eta_y) = -(\xi_1 - \xi_y) \operatorname{tg} \beta.$$

Невідомі координати ξ_1 та η_1 можна визначити з системи лінійних рівнянь:

$$\begin{cases} (\eta_1 - \eta_o) \sin \beta = (\xi_1 - \xi_o) \cos \beta \\ (\eta_1 - \eta_y) = -(\xi_1 - \xi_y) \operatorname{tg} \beta \end{cases}.$$

Вирішуючи приведену систему, отримаємо:

$$\Delta \xi_1 = -C \cos \beta, \quad \Delta \eta_1 = C \sin \beta,$$

де $C = (\eta_y - \eta_o) \sin \beta - (\xi_y - \xi_o) \cos \beta$.

Отже, $l_{kn} = (\Delta \xi_1^2 + \Delta \eta_1^2)^{1/2} = (C^2 \cos^2 \beta + C^2 \sin^2 \beta)^{1/2} = C$, або

$$l_{kn} = (\eta_y - \eta_o) \sin \beta - (\xi_y - \xi_o) \cos \beta.$$

З урахуванням (5.8) вираз $\min l_n$ приймає вигляд:

$$\min l_n = (\eta_y - \eta_o) \sin \beta - (\xi_y - \xi_o) \cos \beta - V_o (t_b - t_y) \sin(\beta - K_y),$$

а формальний вираз для навігаційного обмеження в разі лінійної розподіленої

навігаційної небезпеки записується так:

$$(\eta_y - \eta_o) \sin \beta - (\xi_y - \xi_o) \cos \beta - V_o (t_b - t_y) \sin(\beta - K_y) \geq \hat{l}_n. \quad (5.9)$$

Координати початку ухилення судна ξ_y, η_y залежать від t_y тому величина дистанції найкоротшого зближення $\min l_n$ судна з межею лінійної розподіленої навігаційної небезпеки залежить від обраного курсу ухилення K_y , моменту часу початку ухилення t_y і часу початку повороту до заданої траєкторії t_b . Безпечні курси ухилення повинні унеможливлювати рух судна на навігаційну безпеку з урахуванням гранично допустимої дистанції $\hat{l}_n$, як показано на рис. 5.15.

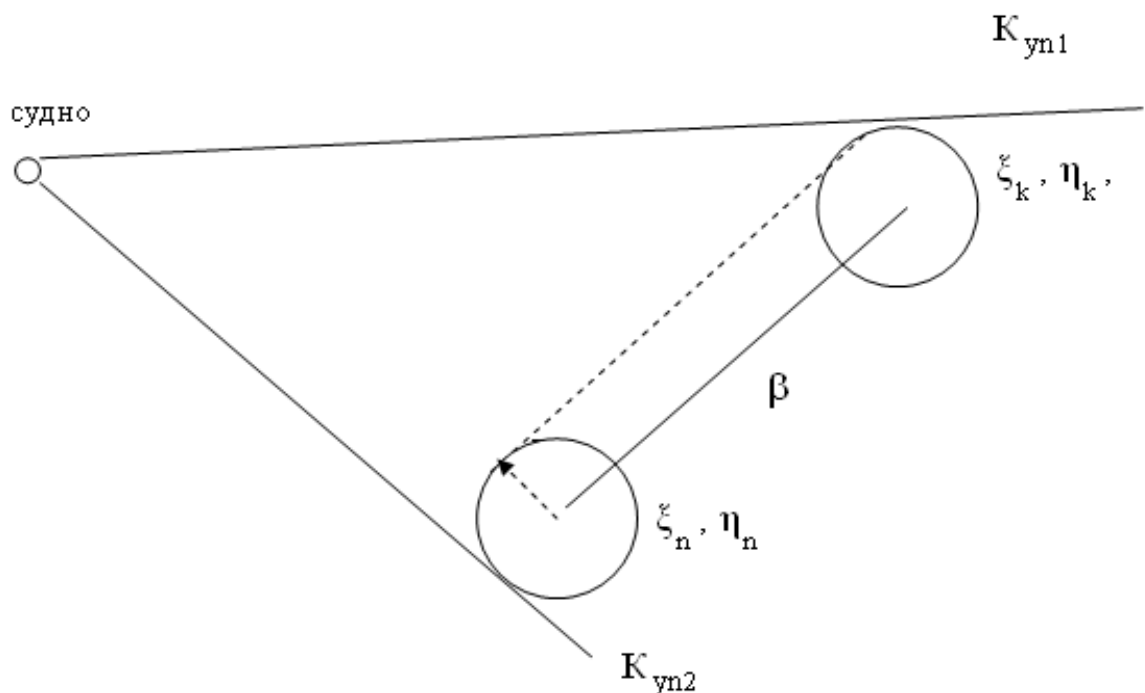


Рис. 5.15. Граничні курси ухилення K_{yn1} та K_{yn2} при лінійній небезпеці

Лініями граничних курсів ухилення K_{yn1} та K_{yn2} є дотичні до кіл радіу-

са $\hat{l}_n$, центри яких знаходяться в кінцевих точках розподіленої лінійної навігаційної небезпеки. Тому граничні безпечні курси K_{yn1} (нижня межа) та K_{yn2} (верхня межа) визначаються виразами:

$$K_{yn1} = \alpha_1 - \arcsin \frac{\hat{l}_n}{D_1}; K_{yn2} = \alpha_2 - \arcsin \frac{\hat{l}_n}{D_2},$$

де α_1 та D_1 – пеленг і дистанція на кінцеву точку ξ_k та η_k лінійної навігаційної небезпеки;

α_2 та D_2 – пеленг і дистанція на початкову точку ξ_n та η_n лінійної навігаційної небезпеки.

Очевидно, що при виборі курсу ухилення судна у випадку небезпечному зближенні з ціллю для врахування лінійної навігаційної небезпеки необхідно вибирати курс ухилення $K_y \notin [K_{yn1}, K_{yn2}]$.

Як ситуації небезпечного зближення суден при наявності розподіленої лінійної навігаційної небезпеки та вибору в цій ситуації безпечного маневру зміною курсу комп'ютерною програмою була згенерована наступна ситуація з параметрами: відносне положення суден $\alpha_{12} = 54^\circ$, $D_{12} = 2,5$ милі і параметрами руху суден $K_1 = 12^\circ$, $V_1 = 15$ вузлів, $K_2 = 268^\circ$, $V_2 = 20$ вузлів, причому $D_d = 1,0$ миля. Прогнозоване значення дистанції найкоротшого зближення становить 0,1 миля. Дана ситуація небезпечного зближення при $V_1 < V_2$ показана на рис. 5.16. Розподілена лінійна навігаційна небезпека розташована попереду у напрямку руху суден. Положення якої відносно першого судна характеризується пеленгом $\alpha_{1n} = 325^\circ$ і дистанцією $D_{1n} = 2,0$ милі на її початкову точку і пеленгом $\alpha_{1k} = 0^\circ$ і дистанцією $D_{1k} = 2,4$ милі на її кінцеву точку, а відносно другого судна - $\alpha_{2n} = 270^\circ$, $D_{2n} = 3,1$ милі, $\alpha_{2k} = 300^\circ$, $D_{2k} = 2,45$ милі відповідно. За положенням країв розподіленої лінійної навігаційної не-

безпеки відносно обох суден і $\hat{I}_n = 0,25$ були розраховані граничні безпечні курси ухилення. В результаті для першого судна були отримані наступні граничні безпечні курси $K_{1y*} = 320^\circ$ та $K_{1y}^* = 9^\circ$, які показані на рис. 5.16 від першого (лівого) судна пунктирними лініями. Для другого (правого) судна $K_{2y*} = 263^\circ$ та $K_{2y}^* = 310^\circ$ відповідно. Отримані граничні курси характеризують підмножину неприпустимих курсів ухилення для кожного з суден.

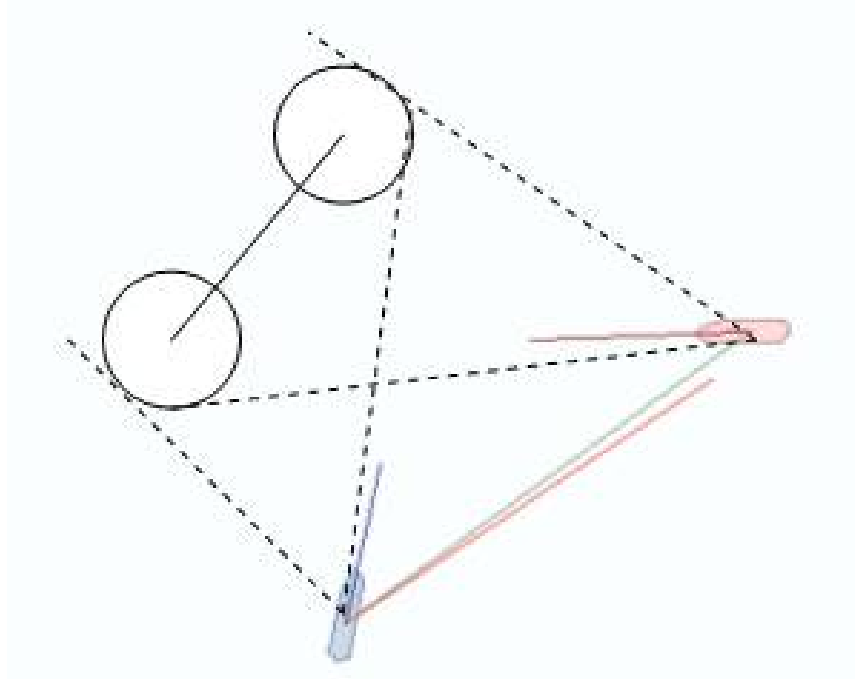


Рис. 5.16. Ситуація зближення при наявності лінійної небезпеки

Для даної ситуації небезпечного зближення на рис. 5.17 зображено область небезпечних курсів судів S_{Dij} . На розширену площину курсів суден пунктирними лініями нанесені граничні безпечні курси ухилення, між якими забороняється використовувати курси ухилення в процесі вибору маневру безпечного їх розходження. В приведеному прикладі для вибору спільного безпечного маневру слід вибрати точку нижньої межі області S_{Dij} , яка перетинається граничним безпечним курсом $K_{1y}^* = 9^\circ$, при цьому другому судну

слід ухилятися курсом $K_{2y} = 230^\circ$. При таких курсах ухилення судна безпечно розходяться і загрози посадки на мілину не має.



Рис. 5.17. Область небезпечних курсів S_{Dij} із врахуванням лінійної небезпеки

Коли не можливо описати межу навігаційної розподіленої небезпеки в першому наближенні за допомогою лінійної залежності, то її доцільно представити у вигляді шматково-лінійної апроксимації (рис. 5.18), тобто містить кілька прямолінійних ділянок з координатами точок зламу ξ_{ni} , η_{ni} , через які вони проходять, і напрямками β_i . В такому випадку в залежності від ступеня точності апроксимації довільна межа навігаційної небезпеки видається кінцевим числом лінійних ділянок ($\Gamma_1 \div \Gamma_4$ на приведеному рисунку), кожен з яких можна розглядати як лінійну навігаційну розподілену небезпеку, опис якої детально наводився вище. Відзначимо, що вибір конкретної ділянки лінійної апроксимації залежить від значення вибраного курсу ухилення K_y базового судна.

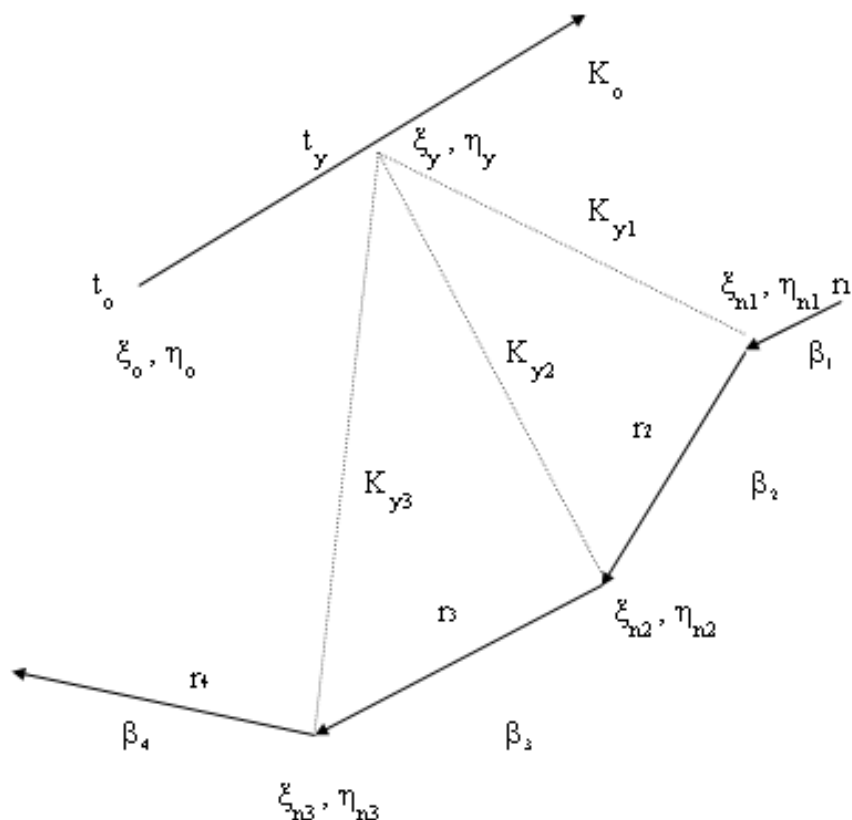


Рис. 5.18. Складна розподілена навігаційна небезпека

Описаний підхід складної розподіленої навігаційної небезпеки є коректним з позицій теоретичного підходу та досить громіздкий. Можливо використовувати більш спрощений опис складної розподіленої навігаційної небезпеки для розглянутого способу вибору безпечного маневру зміною курсів суден, яке визначається за допомогою області небезпечних курсів. Сенс його полягає в наступному.

Складну розподілену навігаційну небезпеку охарактеризуємо координатами її центру і радіусом R_n , який дорівнює максимальній відстані від центру до межі. Причому положення небезпеки відносно судна визначається пеленгом α_n на її центр і дистанцією D_n до нього, а небезпека зближення – гранично допустимою дистанцією $\hat{D}_n$.

У разі зближення судна з небезпечною ціллю при наявності розподіленої

навігаційної небезпеки граничні значення курсів ухилення $K_{yn}^{(p)}$ та $K_{yn}^{(s)}$ знаходяться наступним чином (рис. 5.19):

$$K_{yn}^{(p)} = \alpha_n - \arcsin \frac{R_n + \hat{D}_n}{D_n}, \quad K_{yn}^{(s)} = \alpha_n + \arcsin \frac{R_n + \hat{D}_n}{D_n}.$$

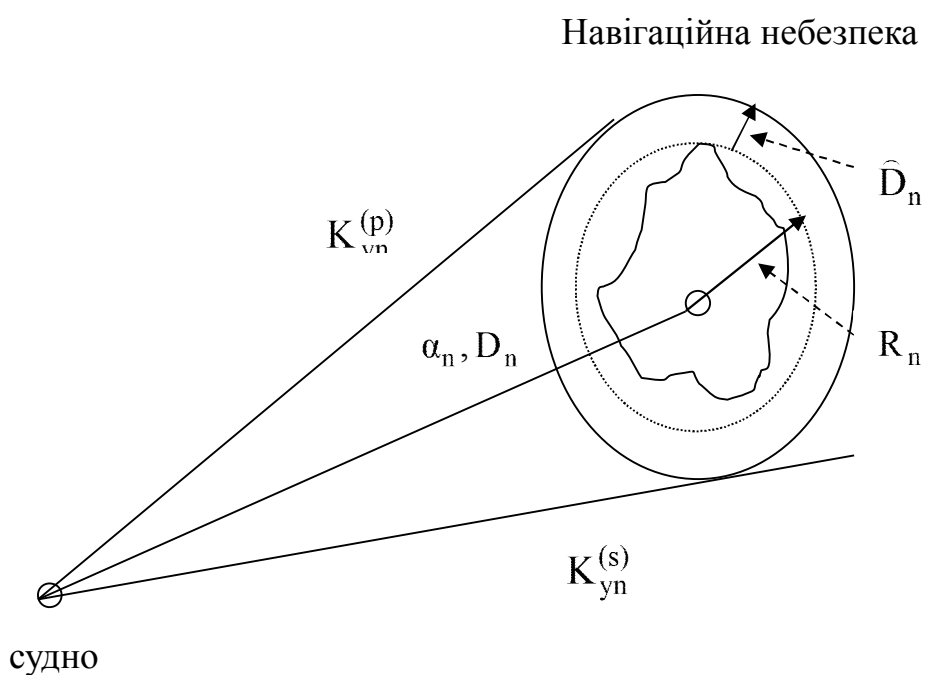


Рис. 5.19. Складна розподілена навігаційна небезпека

Після визначення граничні значення курсів ухилення $K_{yn}^{(p)}$ та $K_{yn}^{(s)}$ кожного з суден, що небезпечно зближуються, у вигляді горизонтальних і вертикальних ліній наносяться на відображення області небезпечних курсів, як показано раніше в приведених прикладах для точкової і розподіленої лінійної навігаційних небезпек.

5.4. Висновки за п'ятим розділом

Розділ присвячений дослідженню питань врахування динаміки суден і навігаційних небезпек при формуванні областей неприпустимих значень параметрів руху і розрахунку їх меж.

Запропоновано процедуру формування області неприпустимих значень курсів суден елементарної групи з урахуванням їх інерційності при зміні курсів. Показано застосування різних динамічних моментів обертального руху судна і їх вплив на безпеку.

Розглянуто спосіб уточненого формування меж областей неприпустимих значень параметрів руху суден елементарної групи при зміні швидкості з урахуванням їх інерційно-гальмівних характеристик. Наведено спосіб розрахунку меж нового типу області неприпустимих значень швидкостей суден елементарної групи, що дозволяє зробити оперативний вибір оптимального маневру зниженням швидкостей суден.

Отримано метод врахування навігаційних небезпек при виборі маневру за допомогою областей неприпустимих значень параметрів руху суден, що передбачає зміну курсу одного або обох суден. Розглянуто особливості методу в залежності від типу навігаційної небезпеки. Розроблено процедури врахування точкової, лінійної і складної розподіленої навігаційної небезпеки.

Матеріали розділу опубліковано в роботах [3, 6, 7, 10, 11-13, 16, 26, 28, 40, 45, 46, 55, 62].

РОЗДІЛ 6.

ВИБІР МАНЕВРУ РОЗХОДЖЕННЯ В СИТУАЦІЇ НЕБЕЗПЕЧНОГО
ЗБЛИЖЕННЯ КІЛЬКОХ СУДЕН

Розроблені методи розрахунку меж і формування областей неприпустимих значень параметрів руху елементарної групи суден за визначенням передбачають тільки ситуації зближення двох суден, хоча в стислих водах часто виникають ситуації небезпечного зближення двох суден при наявності третього судна, що заважає, яке ускладнює процес розходження, або виникають ситуації одночасного небезпечного зближення більше ніж двох суден.

У цьому розділі розглянемо можливість застосування області неприпустимих значень курсів суден і області неприпустимих значень курсів одного судна і швидкостей другого судна для вибору маневру розходження при виникненні згаданих ситуацій.

6.1. Врахування третього судна, що заважає, при виборі безпечного спільного маневру розходження суден зміною їх курсу та швидкості

У попередньому розділі була отримана процедура вибору безпечного спільного маневру розходження суден за допомогою області Ω_{KVj} при відсутності інших суден, які обмежують множину безпечних маневрів розходження.

Розглянемо в районі гаданого маневрування наявність третього судна, що не задіяне в процесі розходження, однак обмежує маневр розходження суден, оскільки може створювати загрозу небезпечного зближення з одним із них або з обома суднами. Таке третє судно будемо називати заважаючим. При наявності судна, що заважає, параметри маневру розходження K_{1y} та V_{2y} для безпечного розходження повинні задовольняти умові переваги дистанцій

найкоротшого зближення між суднами над гранично допустимою дистанцією зближення, що виражається таким аналітичним способом:

$$\begin{cases} \min D_{12}(K_{1y}, V_{2y}) \geq D_d, \\ \min D_{13}(K_{1y}) \geq D_d, \\ \min D_{23}(V_{2y}) \geq D_d. \end{cases} \quad (6.1)$$

При цьому дуже важливим фактором є співвідношення прогнозованих значень часу найкоротшого зближення для кожної пари суден, які залежать від початкових параметрів їх руху. Очевидно, при наявності судна, що заважає, слід розглядати три значення часу найкоротшого зближення $\min t_{12}$, $\min t_{13}$ та $\min t_{23}$. Найбільш часта ситуація небезпечного зближення із заважаючим судном характеризується співвідношенням $\min t_{12} > \min t_{13} > \min t_{23}$. В цьому випадку для маневруючих першого і другого суден необхідно сформувати область Ω_{KVj} неприпустимих курсів першого судна і швидкостей другого судна із врахуванням режиму гальмування, що враховує перша рівність системи (6.1). Після вибору безпечного маневру розходження, як точки (K_{1y}, V_{2y}) межі області Ω_{KVj} необхідно розрахувати значення дистанцій найкоротшого зближення $\min D_{13}(K_{1y})$ та $\min D_{23}(V_{2y})$ відповідно для першого і третього, а також другого і третього суден.

Дистанцію найкоротшого зближення $\min D_{13}(K_{1y})$ між першим і третім суднами визначаємо, виходячи з наступних міркувань. Позначивши дистанцію між першим і третім суднами після повороту першого судна на курс ухилення K_{1y} через D_{13k} , а пеленг, відповідно, – α_{13k} , то, враховуючи, що обидва судна йдуть з незмінними параметрами руху K_{1y} , V_1 та K_3 , V_3 найкоротша дистанція $\min D_{13}(K_{1y})$ визначається за відомою залежністю:

$$\min D_{13}(K_{1y}) = |D_{13k} \sin(K_{oty13} - \alpha_{13k})|, \quad (6.2)$$

де K_{oty13} – відносний курс, який розраховується за формулою:

$$K_{oty13} = \arcsin \left[\frac{(V_1 \sin K_{1y} - V_3 \sin K_3)}{[V_1^2 + V_3^2 - 2V_1 V_3 \cos(K_{1y} - K_3)]^{1/2}} \right].$$

Для визначення дистанції D_{13k} і пеленга α_{13k} необхідно розрахувати різницю координат ΔX_{13k} та ΔY_{13k} між першим і третім суднами в момент завершення повороту першим судном, виходячи зі значень початкових пеленга α_n і дистанції D_n .

Очевидно:

$$\Delta X_{13k} = D_{13n} \sin \alpha_{13n} - \Delta x_o - V_3 \tau_1 \sin K_3,$$

$$\Delta Y_{13k} = D_{13n} \cos \alpha_{13n} - \Delta y_o - V_3 \tau_1 \cos K_3,$$

де Δx_o та Δy_o – приріст координат першого судна за час повороту τ_1 .

Значення дистанції D_{13k} та пеленга α_{13k} розраховуються за допомогою виразів:

$$D_{13k} = \sqrt{\Delta X_{13k}^2 + \Delta Y_{13k}^2},$$

$$\alpha_{13k} = \arcsin \frac{\Delta X_{13k}}{D_{13k}}.$$

Далі, для визначення дистанції найкоротшого зближення $\min D_{23}(V_{2y})$ між другим і третім суднами необхідно провести розрахунки дистанції D_{23k} та пеленг α_{23k} між ними в момент часу закінчення гальмування другого судна, і коли швидкість розходження V_{2y} стане сталою. Для цього знаходимо різницю координат ΔX_{23k} та ΔY_{23k} між першим і третім суднами на зазначений

момент часу:

$$\Delta X_{23k} = D_{23n} \sin \alpha_{23n} - S \sin K_2 - V_3 \tau_b \sin K_3,$$

$$\Delta Y_{23k} = D_{23n} \cos \alpha_{23n} - S \cos K_2 - V_3 \tau_b \cos K_3,$$

де α_{23n} та D_{23n} – початкові пеленг і дистанція між другим і третім суднами;

τ_b та S – час гальмування другого судна і відстань пройдену за цей час, їх розрахунок проводиться з використанням виразів четвертого розділу (4.9) або (4.10) в залежності від режиму гальмування.

По формулам обчислюються дистанція D_{23k} і пеленг α_{23k} :

$$D_{23k} = \sqrt{\Delta X_{23k}^2 + \Delta Y_{23k}^2},$$

$$\alpha_{23k} = \arcsin \frac{\Delta X_{23k}}{D_{23k}}.$$

За допомогою виразу обчислюється дистанція найкоротшого зближення $\min D_{23}(V_{2y})$ між другим і третім суднами:

$$\min D_{23}(V_{2y}) = |D_{23k} \sin(K_{oty23} - \alpha_{23k})|, \quad (6.3)$$

де K_{oty23} – відносний курс, який визначається за формулою:

$$K_{oty23} = \arcsin \left[\frac{(V_{2y} \sin K_2 - V_3 \sin K_3)}{[V_{2y}^2 + V_3^2 - 2V_{2y} V_3 \cos(K_2 - K_3)]^{1/2}} \right].$$

Для оцінки безпечності маневру розходження суден при наявності третього судна, що заважає, була розроблена комп'ютерна програма, яка при виборі маневру розходження, який відповідного певній точці межі області

Ω_{KVj} , розраховує також дистанції $\min D_{13}(K_{1y})$ та $\min D_{23}(V_{2y})$, виводить їх значення на екран монітора і порівнює з гранично допустимою дистанцією зближення. Приклади вибору маневру розходження в ситуації небезпечного зближення суден при наявності третього судна, що заважає, приведені в Додатку В.1.

З рис. 6.1 випливає, що відносні курси K_{oty13} першого і третього суден обмежені курсами K_{oty13*} та K_{oty13}^* , і в цьому випадку дистанція найкоротшого зближення $\min D_{13}(K_{1y})$ дорівнює гранично допустимій дистанції зближення. Для відносних курсів $K_{oty13} \in [K_{oty13*}, K_{oty13}^*]$ виконується нерівність $\min D_{13}(K_{1y}) < d_d$. Таким чином, для відносних курсів K_{oty13*} та K_{oty13}^* насамперед визначаються відповідні граничні курси K_{1y*} та K_{1y}^* , які дають можливість безпечного розходження першого і третього суден. У третьому розділі наведено залежність справжнього курсу судна від відносного курсу, за допомогою якої отримаємо:

$$\begin{aligned} K_{1y*} &= K_{oty13*} + \arcsin [p^{-1} \sin(K_3 - K_{oty13*})], \\ K_{1y}^* &= K_{oty13}^* + \arcsin [p^{-1} \sin(K_3 - K_{oty13}^*)], \end{aligned} \quad (6.4)$$

де $p = V_1 / V_3$;

$$K_{oty13*} = \alpha_{13k} - \arcsin \frac{D_d}{D_{13k}} \text{ та } K_{oty13}^* = \alpha_{13k} + \arcsin \frac{D_d}{D_{13k}}.$$

Отже, курс ухилення першого судна знаходиться за умови $K_{1y} \notin [K_{1y*}, K_{1y}^*]$.

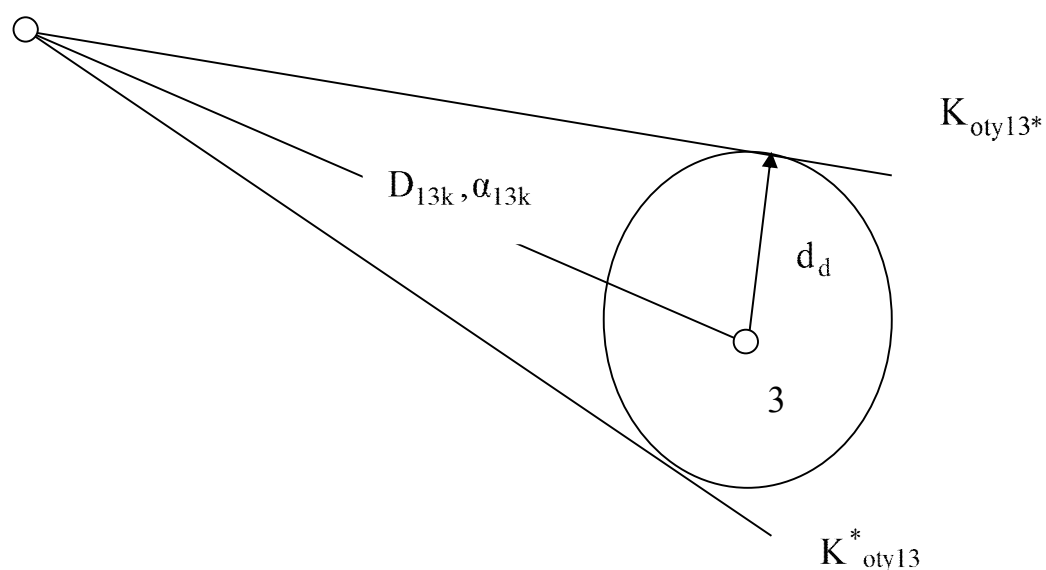


Рис. 6.1. Граничні відносні курси K_{oty13*} та K_{oty13}^*

Відповідно визначаються граничні відносні курси другого і третього суден:

$$\begin{aligned} K_{oty23*} &= \alpha_{23k} - \arcsin \frac{D_d}{D_{23k}}; \\ K_{oty23}^* &= \alpha_{23k} + \arcsin \frac{D_d}{D_{23k}}. \end{aligned} \quad (6.5)$$

Однак при зближенні другого і третього суден потрібно знайти обмеження на швидкість другого судна. Тому виникає необхідність знайти залежність швидкості судна від відносного курсу. Як показано в третьому розділі (3.2):

$$\operatorname{tg} K_{ot} = \frac{\sin K_{ot}}{\cos K_{ot}} = \frac{V_1 \sin K_1 - V_2 \sin K_2}{V_1 \cos K_1 - V_2 \cos K_2}.$$

З останнього виразу:

$$(V_1 \sin K_1 - V_2 \sin K_2) \cos K_{ot} = (V_1 \cos K_1 - V_2 \cos K_2) \sin K_{ot},$$

або, групуючи складові за швидкостями суден:

$$V_2 (\cos K_2 \sin K_{ot} - \sin K_2 \cos K_{ot}) = V_1 (\cos K_1 \sin K_{ot} - \sin K_1 \cos K_{ot}).$$

У дужках останнього рівняння знаходяться вирази синуса різниці двох аргументів. З урахуванням цього:

$$V_2 \sin(K_{ot} - K_2) = V_1 \sin(K_{ot} - K_1).$$

З останнього виразу випливає:

$$V_2 = V_1 \frac{\sin(K_{ot} - K_1)}{\sin(K_{ot} - K_2)}.$$

Тому з урахуванням формули (6.5) для граничних швидкостей при зближенні другого і третього суден отримаємо:

$$V_{2y}^* = V_3 \frac{\sin(K_{oty23}^* - K_3)}{\sin(K_{oty23}^* - K_2)};$$

$$V_{2y^*} = V_3 \frac{\sin(K_{oty23^*} - K_3)}{\sin(K_{oty23^*} - K_2)}. \quad (6.6)$$

В Додатку В.1 для першої ситуації була отримана область Ω_{KVj} при активному гальмуванні другого судна, яка показана на рис. 6.2. За допомогою

виразу (6.5) були розраховані значення граничних курсів $K_{ly*}=334^\circ$ та $K_{ly}^*=45^\circ$, які на рис. 6.2 показані вертикальними лініями. Значення граничних швидкостей $V_{2y}^*=7,15$ вузла та $V_{2y*}=0$ визначені за допомогою (6.6) і відображенні горизонтальними лініями на рис. 6.2.

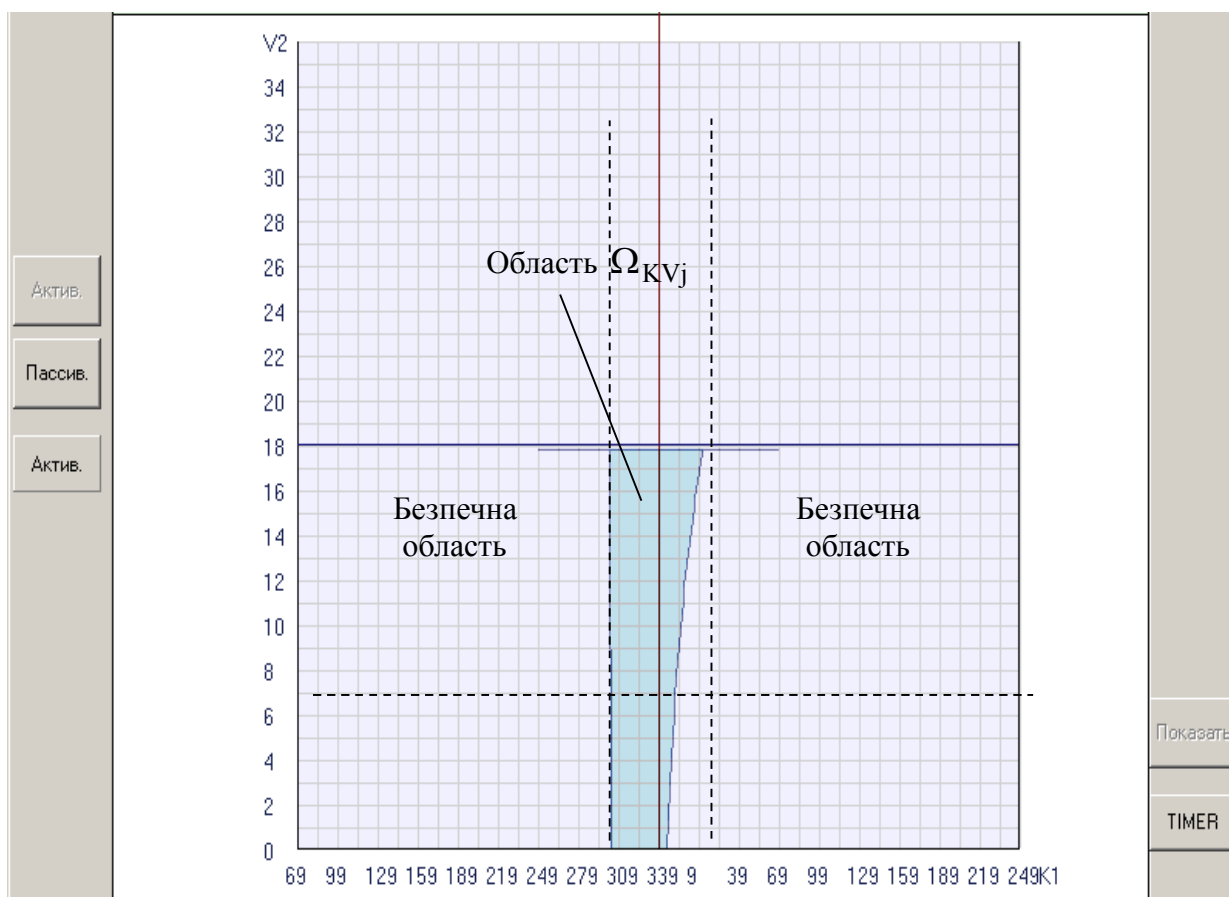


Рис. 6.2. Граничні курси і швидкості для першої ситуації

6.2. Вибір маневру розходження трьох суден за допомогою області неприпустимих значень курсів суден

Припустимо, в районі контролю системи управління рухом суден (СУРС), що здійснює зовнішнє управління процесом розходження, знаходяться три судна, які небезпечно зближуються. У початковий момент часу їх

взаємне положення характеризується пеленгами α_{ij} і дистанціями D_{ij} ($i \neq j$), а взаємне переміщення – відносними курсами K_{otij} і швидкостями V_{otij} . Дистанції найкоротшого зближення $\min D_{ij}$ кожної пари суден менше гранично допустимої дистанції D_d , тобто $\min D_{ij} < D_d$, і, як результат, всі три судна зближуються небезпечно.

СУРС, що здійснює управління суднами, необхідно знайти курси суден K_i , зберігаючи незмінними їх швидкості V_i , при яких дистанції їх найкоротшого зближення будуть більше гранично допустимої дистанції D_d .

Аналітично це виражається наступним чином. З третього розділу використовуємо вираз для $\min D_{ij}$ і отримаємо:

$$\begin{cases} \min D_{12} = \Delta_{12} D_{12} \sin(\alpha_{12} - K_{ot12}) \geq D_d; \\ \min D_{13} = \Delta_{13} D_{13} \sin(\alpha_{13} - K_{ot13}) \geq D_d; \\ \min D_{23} = \Delta_{23} D_{23} \sin(\alpha_{23} - K_{ot23}) \geq D_d, \end{cases} \quad (6.7)$$

де $\Delta_{ij} = -1$, при $\sin(\alpha_{ij} - K_{otij}) < 0$, в іншому випадку $\Delta_{ij} = 1$.

Дистанцію найкоротшого зближення $\min D_{ij}$ можна збільшити зміною K_{otij} , тобто курсів суден K_i . Знайдемо значення курсів суден, що забезпечують виконання умови (6.7).

Кожна з нерівностей (6.7) може бути представити в такому вигляді:

$$\Delta_{ij} D_{ij} \sin(\alpha_{ij} - K_{otij}) \geq D_d, \text{ або } \alpha_{ij} - K_{otij} \geq \arcsin\left(\frac{D_d}{\Delta_{ij} D_{ij}}\right).$$

З останньої нерівності можна записати:

$$\operatorname{tg} K_{otij} \leq \operatorname{tg}[\alpha_{ij} - \arcsin(\frac{D_d}{\Delta_{ij} D_{ij}})]. \quad (6.8)$$

Права частина нерівності (6.8) не залежить від шуканих змінних K_i і її можна позначити, як постійну величину, $k_{ij} = \text{tg}[\alpha_{ij} - \arcsin(\frac{d_d}{\Delta_{ij}D_{ij}})]$. Величина $\text{tg}K_{otij}$ є функцією курсів суден K_i та K_j :

$$\text{tg}K_{otij} = \frac{V_i \sin K_i - V_j \sin K_j}{V_i \cos K_i - V_j \cos K_j}.$$

З урахуванням наведених результатів вираз (6.6) приймає вигляд:

$$\frac{V_i \sin K_i - V_j \sin K_j}{V_i \cos K_i - V_j \cos K_j} \leq k_{ij},$$

звідки отримуємо нерівність:

$$V_i \sin K_i - V_j \sin K_j \leq V_i k_{ij} \cos K_i - V_j k_{ij} \cos K_j,$$

або

$$V_i \sin K_i - V_i k_{ij} \cos K_i \leq V_j \sin K_j - V_j k_{ij} \cos K_j. \quad (6.9)$$

Якщо позначимо $\gamma_{ij} = \alpha_{ij} - \arcsin(\frac{D_d}{\Delta_{ij}D_{ij}})$, то вираз (6.8) приймає наступний вигляд:

$$V_i (\sin K_i - \text{tg} \gamma_{ij} \cos K_i) \leq V_j (\sin K_j - \text{tg} \gamma_{ij} \cos K_j).$$

Помножимо обидві частини нерівності на величину $\frac{\cos \gamma_{ij}}{V_i}$ і отримаємо:

$$(\sin K_i \cos \gamma_{ij} - \cos K_i \sin \gamma_{ij}) \leq \rho_{ij} (\sin K_j \cos \gamma_{ij} - \cos K_j \sin \gamma_{ij}), \quad (6.10)$$

$$\text{де } \rho_{ij} = \frac{V_j}{V_i}.$$

Використовуючи рівняння (6.8), запишемо систему нерівностей для трьох суден:

$$\begin{cases} (\sin K_1 \cos \gamma_{12} - \cos K_1 \sin \gamma_{12}) \leq \rho_{12} (\sin K_2 \cos \gamma_{12} - \cos K_2 \sin \gamma_{12}); \\ (\sin K_1 \cos \gamma_{13} - \cos K_1 \sin \gamma_{13}) \leq \rho_{13} (\sin K_3 \cos \gamma_{13} - \cos K_3 \sin \gamma_{13}); \\ (\sin K_2 \cos \gamma_{23} - \cos K_2 \sin \gamma_{23}) \leq \rho_{23} (\sin K_3 \cos \gamma_{23} - \cos K_3 \sin \gamma_{23}). \end{cases} \quad (6.11)$$

Наведена система нерівностей містить три шукані змінні K_1 , K_2 та K_3 . Вирішуючи систему (6.11) відносно курсів суден, визначимо параметри спільного маневру зміни курсів суден, що забезпечує їх безпечне розходження.

Для вирішення системи нерівностей (6.11) спочатку розглянемо відповідну систему рівностей:

$$\begin{cases} (\sin K_1 \cos \gamma_{12} - \cos K_1 \sin \gamma_{12}) = \rho_{12} (\sin K_2 \cos \gamma_{12} - \cos K_2 \sin \gamma_{12}); \\ (\sin K_1 \cos \gamma_{13} - \cos K_1 \sin \gamma_{13}) = \rho_{13} (\sin K_3 \cos \gamma_{13} - \cos K_3 \sin \gamma_{13}); \\ (\sin K_2 \cos \gamma_{23} - \cos K_2 \sin \gamma_{23}) = \rho_{23} (\sin K_3 \cos \gamma_{23} - \cos K_3 \sin \gamma_{23}), \end{cases} \quad (6.12)$$

кожне рівняння якої представляє собою аналітичний вираз для межі небезпечної області S_{Dij} , що відмежовує неприпустимі поєднання значень пар відповідних курсів K_i . Отримавши з системи рівнянь (6.12) небезпечні області S_{D12} , S_{D13} і S_{D23} , слід вибрати такі значення K_1 , K_2 та K_3 , парні поєднання яких не належали б відповідним небезпечним областям, які відповідно виражаються в такий спосіб:

$$(K_1, K_2) \notin S_{D_{12}}; (K_1, K_3) \notin S_{D_{13}}; (K_2, K_3) \notin S_{D_{23}}.$$

Отримані значення курсів суден гарантують їх розходження на відстанях, що перевищують гранично допустиму дистанцію зближення. У випадку небезпечного зближення трьох суден необхідно визначити небезпечні області кожної пари суден $S_{D_{12}}$, $S_{D_{13}}$ та $S_{D_{23}}$ (рис. 6.3) та безпечні курси розходження визначаються точкою простору $OK_1K_2K_3$, проекції якої не належать жодній небезпечній області, наприклад точка М.

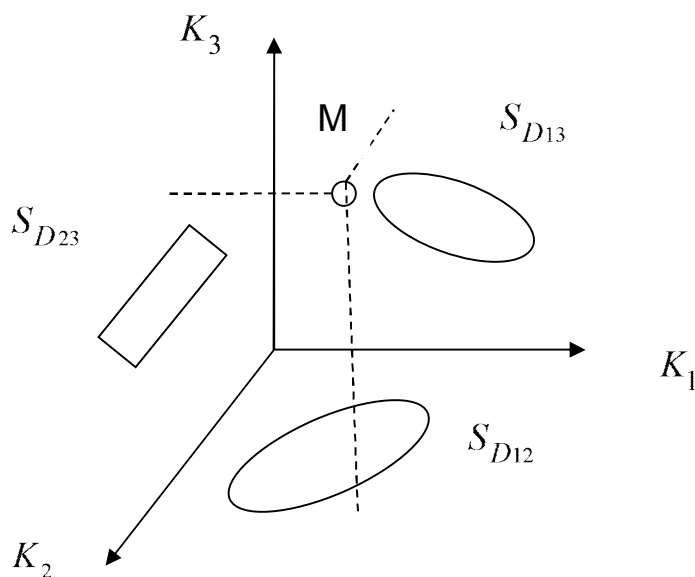


Рис. 6.3. Геометрична інтерпретація безпечних курсів розходження

Розглянемо, для прикладу, ситуацію зближення трьох суден з наступними параметрами руху:

$$V_1 = 20, V_2 = 12, V_3 = 20, K_1 = 60, K_2 = 180, K_3 = 300, \alpha_{12} = 45,$$

$$\alpha_{13} = 75, \alpha_{32} = 315, D_{12} = 3,0, D_{13} = 3,5, D_{32} = 2,5.$$

Початкові позиції суден позначені цифрами 1, 2 і 3 і показані на рис. 6.4. Напрямок та швидкість руху суден показані векторами V_1 , V_2 та V_3 .

Для кожної пари суден за допомогою співвідношень (6.4) на комп'ютері

розраховувалися небезпечні області S_{D12} , S_{D13} та S_{D23} , які також представлені на рис. 6.5. Як випливає з рис. 6.5, парні значення початкових курсів суден належать небезпечним областям, відповідно це точки A_{12} , A_{23} і A_{13} . Отже, дистанції найкоротшого зближення кожної пари суден менші за гранично допустиму дистанцію.

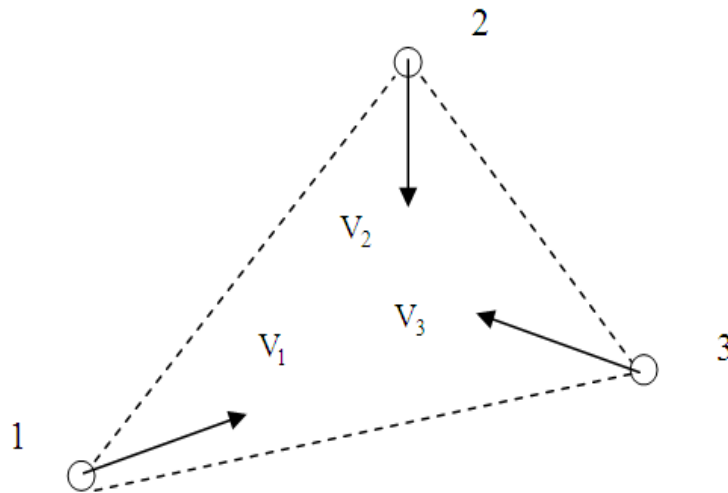


Рис. 6.4. Початкова ситуація небезпечного зближення трьох суден

Для безпечного розходження потрібно змінити курси не менше, ніж двох суден, так, щоб парні курси (K_i, K_j) не знаходились в небезпечних областях, тобто виконувалася вимога (6.12). Вибір курсів ухилення для безпечного розходження зручно проводити графічним способом при наявності графічного відображення небезпечних областей S_{Dij} , як показано на рис. 6.5. Аналіз положення небезпечних областей показує, що зручніше за все змінити курси першого і третього суден, причому їх відхилення від початкових курсів буде мінімальним. Для першого судна доцільно змінити курс вліво до значення 340° . У цьому випадку, як випливає з рис. 6.5, парні курси (K_1, K_2) та (K_1, K_3) не потрапляють до відповідних небезпечних областей при мінімальній зміні курсу K_1 .

Аналогічно, при мінімальній зміні курсу K_3 вправо на курс 340° парні

значення курсів, які показані на рис. 6.5 точками B12, B23 і B13 не потрапляють в області S_{D12} , S_{D13} та S_{D23} , і судна безпечно розходяться.

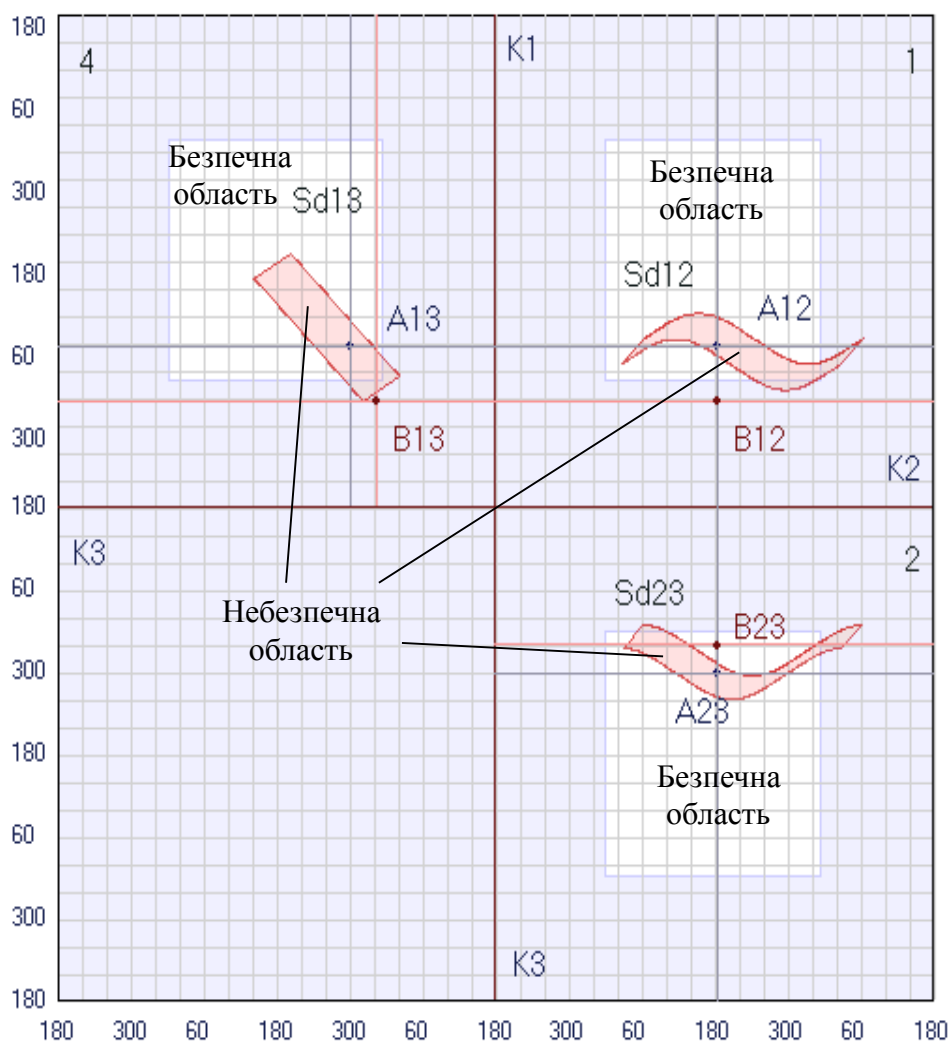


Рис. 6.5. Небезпечні області S_{D12} , S_{D13} та S_{D23}

Ситуація безпечного розходження суден показана на рис. 6.6. З рисунка видно, що друге судно не змінює курс, перше судно ухиляється вліво на курс $K_1 = 340^\circ$, а третє - змінює курс вправо на курс $K_3 = 340^\circ$.

6.3. Визначення оптимального вектору зовнішнього управління групою суден, що небезпечно зближаються

Розглянемо ситуацію, коли в групі, що складається з n взаємодіючих суден, виникає ситуаційне збурення, компенсація якого проводиться вектором управління $u = \{\Delta K_i\}$, де ΔK_i - зміна курсів кожного з суден. Значення ΔK_i вибирається так, що дистанції найкоротшого зближення $\min D_{ij}$ кожної пари суден не менші за гранично допустиму дистанцію D_d ($\min D_{ij} \geq D_d$).

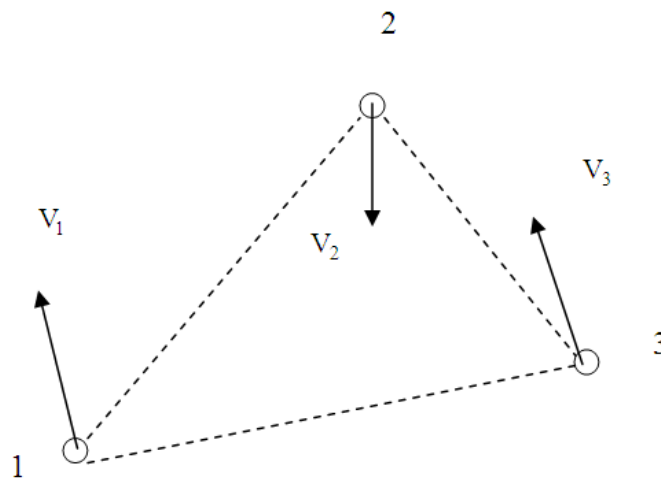


Рис. 6.6. Ситуація безпечного розходження зміною курсів K_1 та K_3

Множина значень керуючого вектору U , при яких для всіх $\min D_{ij}$ виконується умова $\min D_{ij} \geq D_d$, становить його допустиму область U_d . Кожному значенню вектору керування $u = \{\Delta K_i\} \in U_d$ відповідає критерій оптимальності

$Q = \sum_{i=1}^n \Delta K_i^2$. Звертаємо увагу, що критерій оптимальності Q являє собою

квадрат відстані в n -мірному просторі $\Delta K_1 \times \Delta K_2 \times \dots \times \Delta K_i \times \dots \times \Delta K_{n-1} \times \Delta K_n$.

Зрозуміло, що оптимальне значення вектору керування $u_0 = \{\Delta K_i\}$ досягається

при мінімумі критерію оптимальності Q , тобто $\sum_{i=1}^n \Delta K_i^2 = \min$. Це значить,

що при мінімальному значенні Q судна безпечно розходяться при мінімальних відхиленнях від їх початкових курсів на найкоротших відстанях $\min D_{ij} \geq D_d$.

Із врахуванням вищезазначеного задача вибору оптимального вектору керування формалізується наступним чином:

$$Q = \sum_{i=1}^n \Delta K_i^2 \rightarrow \min, \quad \min D_{ij} \geq D_d. \quad (6.13)$$

Останню умову, як було показано раніше, можна записати в такий спосіб:

$$(K_i, K_j) \notin S_{Dij}.$$

Враховуємо, що $K_k = K_{nk} + \Delta K_k$, де K_{nk} – початкове значення курсу k -го судна, і отримаємо:

$$(K_{ni} + \Delta K_i, K_{nj} + \Delta K_j) \notin S_{Dij}.$$

Тому вираз для вихідної задачі (6.13) приймає наступний вигляд:

$$Q = \sum_{i=1}^n \Delta K_i^2 \rightarrow \min, \\ (K_{ni} + \Delta K_i, K_{nj} + \Delta K_j) \notin S_{Dij}. \quad (6.14)$$

Знайдемо значення змін курсів кожного із суден ΔK_k , при яких досягається мінімум критерію оптимальності Q , для чого знайдемо приватні похідні критерію оптимальності по кожній із змінних ΔK_k і прирівняємо їх до нуля, тобто $\frac{\partial Q}{\partial \Delta K_k} = 0$. Із врахуванням виразу для Q отримаємо:

$$\frac{\partial}{\partial \Delta K_k} \left(\sum_{i=1}^n \Delta K_i^2 \right) = 2\Delta K_k = 0,$$

звідки випливає, що мінімальне значення критерію оптимальності Q досягається при прямуванні до нуля змін курсів кожного із суден ΔK_k . Оскільки при небезпечному зближенні пари суден точка (K_i, K_j) знаходиться в небезпечній області S_{Dij} , то мінімальна зміна курсу досягається при значенні курсу ухилення, який відповідає межі небезпечної області. Якщо точки межі небезпечної області позначити (K_i^*, K_j^*) , то для забезпечення мінімуму критерія оптимальності Q , мінімальне допустиме значення зміни курсу ΔK_k визначається виразом:

$$\begin{aligned} \Delta K_k &= 0, \text{ якщо } (K_{nk}, K_{nj}) \notin S_{Dij}; \\ \Delta K_k &= K_k^* - K_{nk}, \text{ якщо } (K_{nk}, K_{nj}) \in S_{Dij}. \end{aligned} \quad (6.15)$$

Якщо зміни курсів суден ΔK_k вибрати відповідно до виразу (6.15), то буде реалізований оптимальний вектор керування $u_o = \{\Delta K_i\} \in U_d$, що належить до допустимої області, що забезпечує мінімальне значення критерію оптимальності Q .

Залежно від структури матриці ситуаційного збурення W_{bn} [84], елементами якої є значення ситуаційних збурень пар суден групи, безпечне розходження суден може вимагати зміни курсу різної кількості суден групи, яка взаємодіє (від одного до всіх). Тому більш доцільнішим є маневр розходження, в якому менша кількість суден змінює курс. Іншими словами, кращим є керуючий вектор, у якого більша кількість компонент дорівнює нулю. Однак для кожного значення керуючого вектору U_m із заданим значенням m ненульових компонент ΔK_i визначено граничне значення критерію оптимальності Q_m^* , яке регламентує необхідність збільшення на одиницю розмірності керу-

ючого вектору U_{m+1} .

Розглянемо найпростіший випадок небезпечного зближення двох суден. В цьому випадку виникає ситуаційне збурення $\omega_{12}=1$, яке може бути компенсовано зміною курсу одного з суден при незмінному курсі іншого судна.

Припустимо, спочатку змінюється курс першого судна K_1 на величину ΔK_1 , причому величина зміни курсу ΔK_1 при мінімальному значенні повинна забезпечити звертання ситуаційного збурення ω_{12} в нуль ($\omega_{12}=0$), при цьому повинна виконуватися умова $G_2^{(1)}$ (нижній індекс вказує число в групі взаємодії, а верхній – змінюваний курс):

$$\begin{aligned} \Delta K_1 &\rightarrow \min, \\ (K_{n1} + \Delta K_1, K_{n2}) &\notin S_{D12}. \end{aligned} \quad (6.16)$$

При зміні курсу другого судна K_2 на величину ΔK_2 також можлива компенсація ситуаційного збурення ω_{12} ($\omega_{12}=0$) з урахуванням умови $G_2^{(2)}$:

$$\begin{aligned} \Delta K_2 &\rightarrow \min, \\ (K_{n2} + \Delta K_2, K_{n3}) &\notin S_{D23}. \end{aligned} \quad (6.17)$$

Якщо обидва маневри існують, то вибирається той маневр, для якого менша зміна курсу ΔK_1 або ΔK_2 . Якщо маневр зміною курсу позначити $M_i(\Delta K)$, то:

$$M_i(\Delta K) = \begin{cases} M_1(\Delta K_1), & \Delta K_1 < \Delta K_2, \\ M_2(\Delta K_2), & \Delta K_2 < \Delta K_1. \end{cases}$$

Якщо маневри $M_1(\Delta K_1)$ та $M_2(\Delta K_2)$ не існують, то слід використовувати маневр одночасної зміни курсу обома суднами, при цьому має виконувати-

ся умова $G_2^{(1,2)}$:

$$Q_2^{(1,2)} = (\Delta K_1^2 + \Delta K_2^2) \rightarrow \min ,$$

$$(K_{n1} + \Delta K_1, K_{n2} + \Delta K_2) \notin S_{D12} .$$

Розглянемо залежність алгоритму пошуку оптимального значення керуючого вектору від структури матриці ситуаційного збурення W_{bn} для випадку групи з трьох взаємодіючих суден. В цьому випадку матриця ситуаційного збурення W_{b3} містить три окремих ситуаційних збурення ω_{12} , ω_{13} та ω_{23} , кожне з яких може приймати значення 1 або 0, за винятком $\omega_{12} = \omega_{13} = \omega_{23} = 0$. Керуючий вектор містить три компоненти $U_3 = \{\Delta K_1, \Delta K_2, \Delta K_3\}$, а критерій

оптимальності $Q_3 = \sum_{i=1}^3 \Delta K_i^2$. Структура матриці ситуаційного збурення W_{b3}

визначається числом ситуаційних збурень ω_{ij} , що дорівнюють 1. Так, якщо одне ситуаційне збурення дорівнює 1, то в цьому випадку структура матриці W_{b3} позначається $St_3^{(1)}$ і містить 3 варіанти ($\omega_{12}=1, \omega_{13}=0, \omega_{23}=0$), ($\omega_{12}=0, \omega_{13}=1, \omega_{23}=0$) та ($\omega_{12}=0, \omega_{13}=0, \omega_{23}=1$).

Розглянемо один з варіантів $St_3^{(1)}(\omega_{23})$, де в дужках вказується ситуаційне збурення, що дорівнює 1, тобто ($\omega_{12}=0, \omega_{13}=0, \omega_{23}=1$). В даному варіанті ситуаційне збурення ω_{23} може бути компенсовано зміною ΔK_2 курсу K_2 , попереджаючи виникнення $\omega_{12}=1$. У цьому випадку точка (K_2, K_3) не повинна належати небезпечній області S_{D23} , аналогічно точка (K_1, K_2) повинна знаходитися поза областю S_{D12} . Аналітично ця умова $^{(1)}G_3^{(2)}$ записується в такий спосіб:

$$\Delta K_2 \rightarrow \min ,$$

$$(K_{n2} + \Delta K_2, K_{n3}) \notin S_{D23}, \quad (6.18)$$

$$(K_{n1}, K_{n2} + \Delta K_2) \notin S_{D12} .$$

Ситуаційне збурення ω_{23} також може бути компенсовано зміною ΔK_3 курсу K_3 , попереджаючи виникнення $\omega_{13}=1$. При цьому визначальною є умова $^{(1)}G_3^{(3)}$, тобто:

$$\begin{aligned} \Delta K_3 &\rightarrow \min, \\ (K_{n3} + \Delta K_3, K_{n2}) &\notin S_{D23}, \\ (K_{n1}, K_{n3} + \Delta K_3) &\notin S_{D13}. \end{aligned} \quad (6.19)$$

Отримавши значення ΔK_2 та ΔK_3 , вибирається менший з них $\Delta K_s = \min(\Delta K_2, \Delta K_3)$ і змінюємо відповідний курс K_s на величину ΔK_s . При цьому критерій оптимальності Q_3 досягає мінімального значення.

Можлива ситуація, коли справедлива нерівність $D_{ij} > D_d$, однак різниця $D_{ij} - D_d$ приймає невеликі значення, то в такому випадку, можливо, що значення ΔK_2 та ΔK_3 не визначені або критерій оптимальності Q_3 перевищує граничне значення Q_m^* . При цьому слід використовувати спільний маневр зміни курсів двох суден K_2 та K_3 на величини ΔK_2 та ΔK_3 , причому має виконуватися умова $^{(1)}G_3^{(2,3)}$:

$$\begin{aligned} Q_3 &= (\Delta K_2^2 + \Delta K_3^2) \rightarrow \min, \\ (K_{n2} + \Delta K_2, K_{n3} + \Delta K_3) &\notin S_{D23}, \\ (K_{n1}, K_{n2} + \Delta K_2) &\notin S_{D12}, \\ (K_{n1}, K_{n3} + \Delta K_3) &\notin S_{D13}. \end{aligned} \quad (6.20)$$

Аналогічно розглядаються інші два варіанти структури $St_3^{(1)}$, тобто $St_3^{(1)}(\omega_{12})$ та $St_3^{(1)}(\omega_{13})$.

Якщо два ситуаційних збурення з трьох рівні 1, то в цьому випадку структура матриці W_{b3} позначається $St_3^{(2)}$ і містить 3 варіанти ($\omega_{12}=1$, $\omega_{13}=1$, ω_{23}

$=0$), $(\omega_{12}=1, \omega_{13}=0, \omega_{23}=1)$ та $(\omega_{12}=0, \omega_{13}=1, \omega_{23}=1)$. Припустимо, реалізується один з варіантів $(\omega_{12}=0, \omega_{13}=1, \omega_{23}=1)$.

Відзначимо, що зміною тільки курсу K_1 або K_2 компенсувати одночасно ситуаційні збурення ω_{13} та ω_{23} неможливо, оскільки зміна курсу K_1 не впливає на ω_{23} , а зміна курсу K_2 не впливає на ситуаційне збурення ω_{13} .

Одночасна компенсація ситуаційних збурень ω_{13} та ω_{23} зміною тільки одного курсу можлива при використанні лише курсу K_3 . При цьому точки (K_i, K_j) мають знаходитися поза межами відповідних небезпечних областей S_{Dij} . Вибір зміни ΔK_3 курсу K_3 повинен задовільнити наступну умову $^{(2)}G_3^{(3)}$:

$$\begin{aligned} \Delta K_3 &\rightarrow \min, \\ (K_{n3} + \Delta K_3, K_{n2}) &\notin S_{D23}, \\ (K_{n1}, K_{n3} + \Delta K_3) &\notin S_{D13}. \end{aligned} \quad (6.21)$$

Якщо значення ΔK_3 не визначене або критерій оптимальності Q_3 перевищує граничне значення Q_3^* , то необхідно використовувати маневр зміни курсу двох суден. Якщо використовувати пару курсів K_1 та K_3 , то обидва курси впливають на ω_{13} , а курс K_3 впливає на ω_{23} . Зміна курсів ΔK_1 та ΔK_3 вибираються таким чином, щоб виконувалася раніше сформульована умова $^{(2)}G_3^{(1,3)}$:

$$\begin{aligned} Q_3^{(1,3)} &= (\Delta K_1^2 + \Delta K_3^2) \rightarrow \min, \\ (K_{n2}, K_{n3} + \Delta K_3) &\notin S_{D23}, \\ (K_{n1} + \Delta K_1, K_{n2}) &\notin S_{D12}, \\ (K_{n1} + \Delta K_1, K_{n3} + \Delta K_3) &\notin S_{D13}. \end{aligned} \quad (6.22)$$

У разі зміни курсів K_1 та K_2 всі три ситуаційні збурення зазнають зміни.

Приріст курсів ΔK_1 та ΔK_2 визначаються з наступної умови $^{(2)}G_3^{(1,2)}$:

$$\begin{aligned} Q_3^{(1,2)} &= (\Delta K_1^2 + \Delta K_2^2) \rightarrow \min, \\ (K_{n2} + \Delta K_2, K_{n3}) &\notin S_{D23}, \\ (K_{n1} + \Delta K_1, K_{n2} + \Delta K_2) &\notin S_{D12}, \\ (K_{n1} + \Delta K_1, K_{n3}) &\notin S_{D13}. \end{aligned} \quad (6.23)$$

І, нарешті, компенсація ситуаційних збурень ω_{13} та ω_{23} можлива зміною курсів K_2 та K_3 відповідно на величини ΔK_2 та ΔK_3 , величина яких встановлюється за допомогою співвідношення $^{(2)}G_3^{(2,3)}$:

$$\begin{aligned} Q_3^{(2,3)} &= (\Delta K_2^2 + \Delta K_3^2) \rightarrow \min, \\ (K_{n2} + \Delta K_2, K_{n3} + \Delta K_3) &\notin S_{D23}, \\ (K_{n1}, K_{n2} + \Delta K_2) &\notin S_{D12}, \\ (K_{n1}, K_{n3} + \Delta K_3) &\notin S_{D13}. \end{aligned} \quad (6.24)$$

Отримані значення критерію оптимальності $Q_3^{(1,2)}$, $Q_3^{(1,3)}$ та $Q_3^{(2,3)}$ порівнюємо між собою, знаходячи з мінімальною величиною $Q_{3\min}$, тобто $Q_{3\min} = \min(Q_3^{(1,2)}, Q_3^{(1,3)}, Q_3^{(2,3)})$, і за його верхніми індексами визначаємо пару курсів та їх прирости, які є оптимальними. якщо величина $Q_{3\min}$ перевищує граничне значення Q_3^* , то використовується заключний варіант компенсації ситуаційних збурень ω_{13} та ω_{23} зміною всіх трьох курсів K_1 , K_2 та K_3 відповідно на величини ΔK_1 , ΔK_2 та ΔK_3 , які визначаються з умови $^{(2)}G_3^{(1,2,3)}$:

$$\begin{aligned} Q_3^{(\Sigma)} &= (\Delta K_1^2 + \Delta K_2^2 + \Delta K_3^2) \rightarrow \min, \\ (K_{n2} + \Delta K_2, K_{n3} + \Delta K_3) &\notin S_{D23}, \end{aligned} \quad (6.25)$$

$$(K_{n1} + \Delta K_1, K_{n2} + \Delta K_2) \notin S_{D12},$$

$$(K_{n1} + \Delta K_1, K_{n3} + \Delta K_3) \notin S_{D13}.$$

Структура матриці збурення $St_3^{(3)}$ реалізується, коли всі три ситуаційні збурення дорівнюють 1, тобто $\omega_{12}=1$, $\omega_{13}=1$ та $\omega_{23}=1$. В цьому випадку для компенсації всіх трьох ситуаційних збурень необхідна зміна не менш ніж двох курсів, причому в загальному випадку розглядаємо три пари курсів з приростами, які визначаються за допомогою умов (6.16), (6.17) та (6.18). Потім аналогічно знаходимо оптимальний вектор керування u_0 з допустимим значенням критерію оптимальності Q_{3min} . Якщо ж $Q_{3min} > Q_3^*$, то як і в попередньому випадку прирости всіх трьох курсів знаходимо з умови (6.19). При будь-якій структурі $St_3^{(k)}$, якщо рішення з пошуку оптимального вектору відсутнє, то необхідно зменшити гранично допустиму дистанцію найкоротшого зближення D_d і повторити пошук значення оптимального вектору керування.

Для встановлення загального принципу пошуку оптимального керуючого вектору при довільній кількості суден у взаємодіючій групі в Додатку В розглянута група, що складається з чотирьох суден. Аналіз розглянутого методу формування оптимального вектору, який звертає матрицю ситуаційного збурення в нульову матрицю і забезпечує безпечне розходження групи суден, показує, що найбільш доцільною є його комп'ютерна реалізація.

6.4. Вибір оптимального вектору керування способом комп'ютерного сканування небезпечних областей парних маневрів

У попередньому підрозділі було отримано умову вибору оптимального вектору керування, яка зокрема має вигляд для ситуації небезпечного зближення чотирьох суден при необхідності зміни курсів кожного:

$$Q_4^{(\Sigma)} = (\Delta K_1^2 + \Delta K_2^2 + \Delta K_3^2 + \Delta K_4^2) \rightarrow \min$$

$$(K_{n1} + \Delta K_1, K_{n2} + \Delta K_2) \notin S_{D12}, (1)$$

$$(K_{n1} + \Delta K_1, K_{n3} + \Delta K_3) \notin S_{D13}, (2)$$

$$(K_{n1} + \Delta K_1, K_{n4} + \Delta K_4) \notin S_{D14}, (3)$$

$$(K_{n2} + \Delta K_2, K_{n3} + \Delta K_3) \notin S_{D23}, (4)$$

$$(K_{n2} + \Delta K_2, K_{n4} + \Delta K_4) \notin S_{D24}, (5)$$

$$(K_{n3} + \Delta K_3, K_{n4} + \Delta K_4) \notin S_{D34}. (6)$$

Для пошуку оптимальних значень прирощень курсу ΔK_1 , ΔK_2 , ΔK_3 та ΔK_4 можна поступити наступним чином. Відзначимо, що в наведеній умові шість виразів виду $(K_{ni} + \Delta K_i, K_{nj} + \Delta K_j) \notin S_{Dij}$ еквівалентні умовам $\min D_{ij}(\Delta K_i, \Delta K_j) > D_d$.

З огляду на те, що в початковому стані для дистанцій найкоротшого зближення між першим судном і іншими суднами справедливі нерівності $\min D_{1j}(\Delta K_1, \Delta K_j) < D_d$ ($j > 1$), тобто $(K_{n1} + \Delta K_1, K_{nj} + \Delta K_j) \in S_{D1j}$, збільшуємо значення приросту курсу ΔK_1 на 1° , і розраховуємо значення $\min D_{1j}(\Delta K_1, \Delta K_j)$ ($j > 1$), порівнюючи їх з гранично допустимою дистанцією D_d . Збільшення приросту курсу ΔK_1 проводиться до тих пір, поки для дистанцій $\min D_{1j}(\Delta K_1, \Delta K_j)$ ($j > 1$) не наступить співвідношення $\min D_{1j}(\Delta K_1, \Delta K_j) \geq D_d$ ($j > 1$).

В цьому випадку приріст курсу ΔK_1 не змінюється, а умови (1) – (3) залишаються істинними. Далі відбувається збільшення приросту курсу ΔK_2 з кроком 1° і розраховуються дистанції $\min D_{21}(\Delta K_2, \Delta K_1)$, $\min D_{23}(\Delta K_2, \Delta K_3)$ та $\min D_{24}(\Delta K_2, \Delta K_4)$, при цьому стежимо, щоб значення $\min D_{21}(\Delta K_2, \Delta K_1)$ не зменшилося за гранично допустиму дистанцію D_d . Збільшення приросту курсу ΔK_2 припиняється, якщо досягаються співвідношення:

$$\begin{aligned}\min D_{21}(\Delta K_2, \Delta K_1) &\geq D_d, \\ \min D_{23}(\Delta K_2, \Delta K_3) &\geq D_d, \\ \min D_{24}(\Delta K_2, \Delta K_4) &\geq D_d.\end{aligned}$$

В цьому випадку умови (1) – (5) є істинними, і необхідно зробити істинною останню умову (6):

$$\min D_{34}(\Delta K_3, \Delta K_4) \geq D_d.$$

Таким чином, при фіксованих приростах курсів ΔK_1 та ΔK_2 виконується сканування площини $K_3 \times K_4$, тобто для кожної точки площині розраховується дистанція найкоротшого зближення $\min D_{34}(\Delta K_3, \Delta K_4)$ і зіставляється за величиною з гранично допустимою дистанцією D_d . Якщо виконується умова $\min D_{34}(\Delta K_3, \Delta K_4) \geq D_d$, то маневр з приростами курсів ΔK_1 , ΔK_2 , ΔK_3 , ΔK_4 є безпечним і для цього маневру проводиться розрахунок критерію оптимальності $Q_4^{(\Sigma)} = \Delta K_1^2 + \Delta K_2^2 + \Delta K_3^2 + \Delta K_4^2$. З ростом числа безпечних маневрів відбирається маневр з мінімальним значенням критерію оптимальності та його параметри приймаються оптимальними. Після закінчення сканування площини $K_3 \times K_4$ значення приросту курсу ΔK_2 збільшується на 1° . Процедура сканування площини $K_3 \times K_4$ повторюється та розраховується для кожної точки безпечного маневру критерію оптимальності. А також фіксуються оптимальні параметри маневру. Провівши сканування для всіх значень приросту курсу ΔK_2 через 1° , значення ΔK_2 приймає початкове значення, а приріст курсу ΔK_1 збільшується на 1° і для нового незмінного значення ΔK_1 виконується збільшення ΔK_2 на 1° з подальшим скануванням площини $K_3 \times K_4$. В процесі цього виявляються безпечні маневри та розраховуються критерії їх оптимальності з вибором маневру при мініальному критерію оптимальності.

Після чергового покрокового збільшення приросту курсу ΔK_2 за всіма можливими значеннями. Вичерпавши сканування за всіма значеннями зі ска-

нуванням площині $K_3 \times K_4$ на кожному етапі та відборі оптимального маневру розходження проводиться послідовне збільшення приросту курсу ΔK_1 за всіма можливими значеннями. Вичерпавши сканування за всіма значеннями ΔK_1 , вибір оптимального маневру завершується. Маневр, який має мінімальне значення критерію оптимальності $Q_4^{(\Sigma)}$, вибирається в якості оптимального маневру розходження.

На рис. 6.7 наведено алгоритм пошуку оптимального маневру способом сканування. Як приклад розглядалася ситуація небезпечного зближення трьох суден. Відповідно до наведеного алгоритму була написана програма, за допомогою якої проводився пошук оптимального маневру розходження. На рис. 6.8 зображені результати розрахунку оптимального маневру розходження і показані у вигляді точок на розширених площинах $K_1 \times K_2$, $K_1 \times K_3$ та $K_2 \times K_3$. Кожна точка позначена колом з невеликим радіусом.

Звертаємо увагу на те, що точки на всіх трьох розширених площинах знаходяться за межами областей небезпечних курсів, але поряд з їх межами.

6.5. Реалізація графічного способу визначення оптимального маневру розходження групи суден за допомогою комп'ютерного моделювання.

У попередньому підрозділі було показано, що для визначення параметрів оптимального маневру розходження групи суден оператором, використовується графічний спосіб комп'ютерного моделювання. Він істотно залежить від розмірів відображення розширених площин та небезпечних областей курсів суден на екрані комп'ютера. Найбільш точним є відображення небезпечних областей курсів для пари суден. Тому в даному підрозділі розглянуто варіант програми імітаційного моделювання для групи суден з використанням відображення небезпечних областей курсів для двох суден. Розглядається група суден максимальною кількістю п'ять.

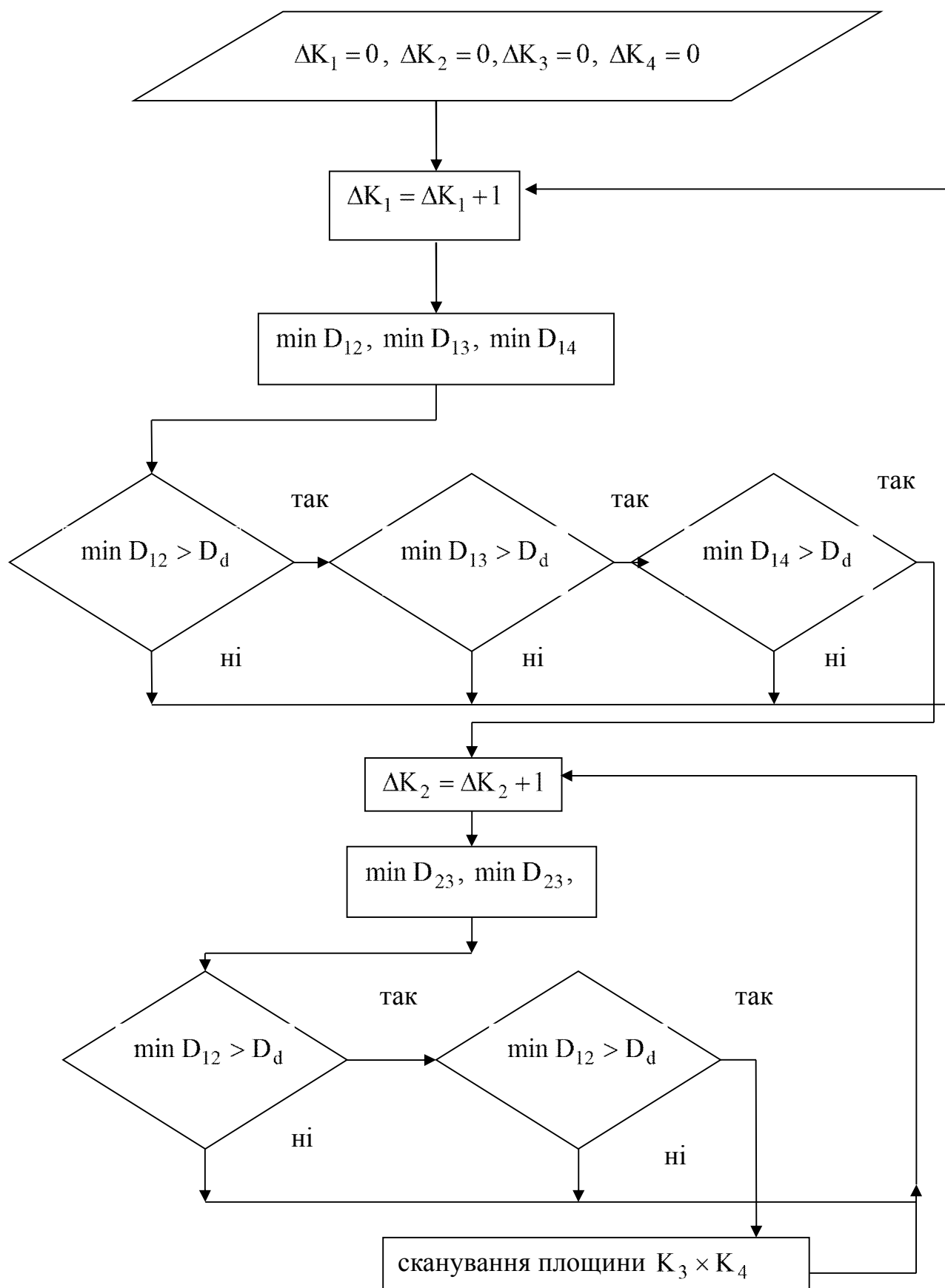


Рис. 6.7. Алгоритм пошуку оптимального вектору

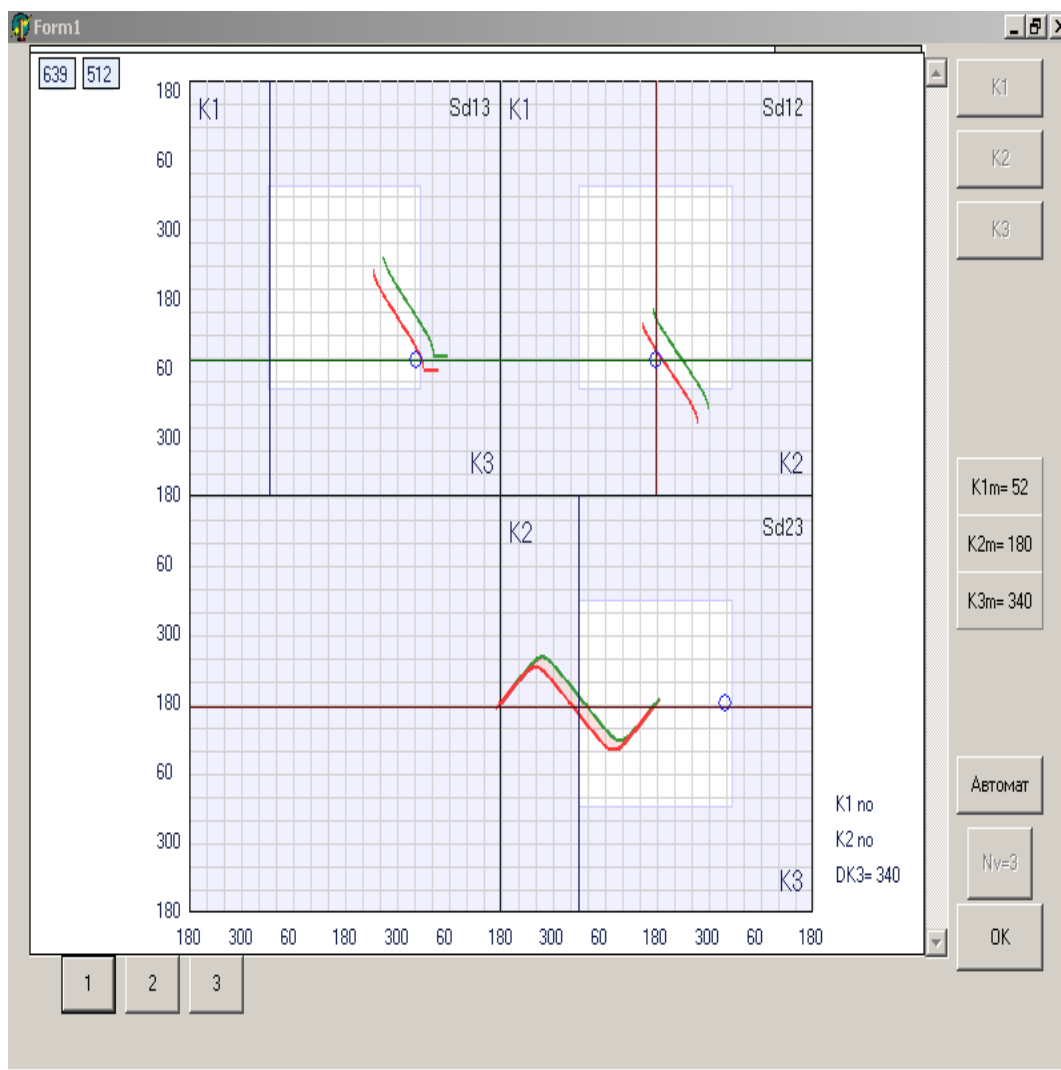


Рис. 6.8. Результати розрахунку маневру розходження трьох суден

У лівому нижньому кутку екрану виводиться індикатор небезпеки зближення, при наявності ситуаційного збурення відповідні сегменти індикатора фарбуються в червоний колір.

На рис. 6.9 показана ситуація зближення групи суден, що складається з п'яти суден, причому, як впливає зі стану індикатора небезпеки, перші чотири судна зближуються небезпечно, тобто всі їхні парні ситуаційні збурення існують, а п'яте судно вільно рухається без небезпечного зближення з іншими суднами.

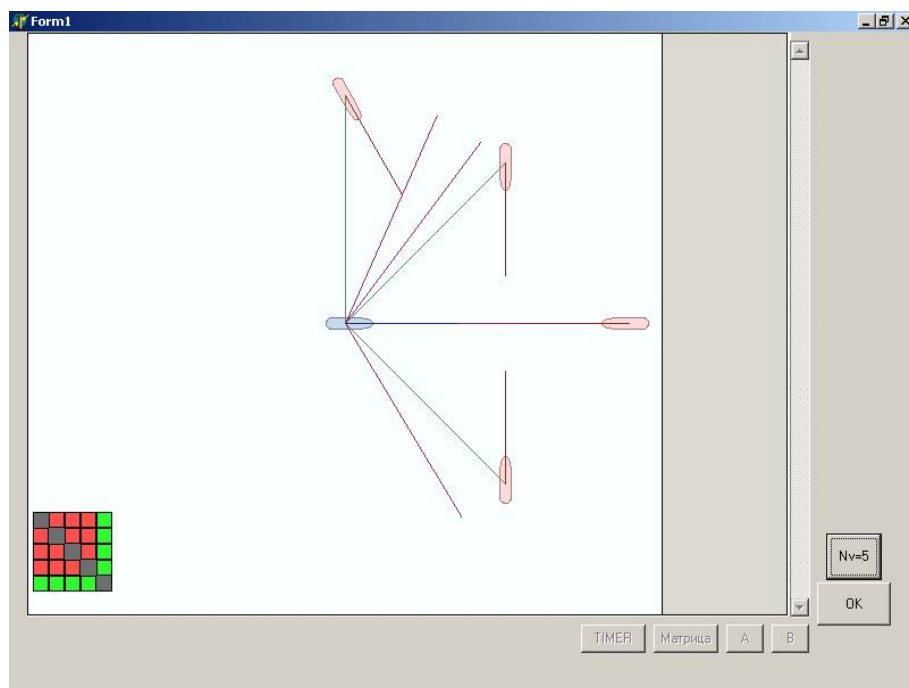


Рис. 6.9. Початкова ситуація зближення групи з п'яти суден

В подальшому графічний спосіб вибору оптимального маневру розходження групи із п'яти суден комп'ютерним моделюванням продовжено в Додатку В. Також у Додатку В розглянуті ситуації небезпечного зближення груп з трьох і чотирьох суден, для яких графічним способом комп'ютерного моделювання визначено оптимальні маневри розходження, чим підтверджується коректність запропонованого способу вибору оптимального маневру розходження групи суден.

6.6. Висновки за шостим розділом

У шостому розділі розглянуто ситуації небезпечного зближення групи суден, числом більше двох, і способи вибору безпечного маневру розходження в таких ситуаціях.

Запропоновано процедуру врахування третього судна, що заважає, при виборі безпечного спільного маневру розходження зміною курсу і швидкості

пари суден, причому розглянуто як активне, так і пасивне гальмування судна, що знижує швидкість. Показана комп'ютерна реалізація запропонованої процедури.

Розроблено спосіб вибору маневру розходження трьох суден за допомогою спільного застосування області неприпустимих значень курсів суден групи.

Досліджено питання визначення оптимального вектору зовнішнього керування групою суден, що небезпечно зближаються шляхом мінімальної зміни їх курсів прямування. Показано можливості комп'ютерної реалізації методу.

Розроблена процедура вибору оптимального вектору керування за допомогою комп'ютерного сканування небезпечних областей парних маневрів, а також запропонована реалізація графічного способу визначення оптимального маневру розходження групи суден за допомогою комп'ютерного моделювання.

Матеріали розділу опубліковано в роботах [4, 8, 19, 20, 22, 24, 25, 41, 49, 50, 52].

РОЗДІЛ 7.

АНАЛІТИЧНІ МЕТОДИ ПОПЕРЕДЖЕННЯ ЗІТКНЕННЯ СУДЕН ДЛЯ НЕСТАНДАРТНИХ ДОМЕНІВ

До нестандартної будемо відносити аналітичну систему попередження зіткнення суден, форма домену якої відмінна від кола. В даний час найбільш повно досліджені домени, які мають форму еліпса, прямокутника і напівкола-напівеліпса. Отже, синтез аналітичних систем попередження зіткнення суден з доменами згаданих форм становить зміст даного розділу.

7.1. Залежність гранично допустимої дистанції зближення D_d від параметрів ситуації зближення і форми безпечного домену

Як раніше зазначалося, у разі, коли форма безпечного домену відрізняється від кола, гранично допустима дистанція зближення D_d не є постійною, а залежить від параметрів ситуації зближення, в першу чергу пеленга на ціль α і курсу цілі K_c , як показано на рис. 7.1.

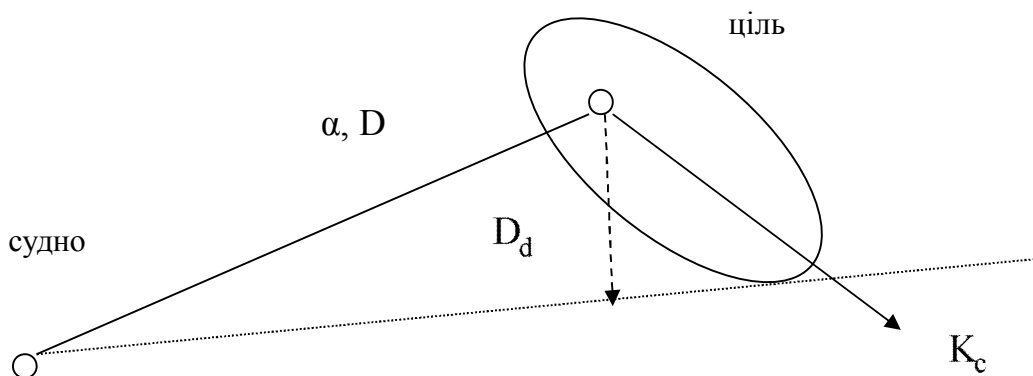


Рис. 7.1. Визначення гранично допустимої дистанції зближення

Для безпечного розходження судна з небезпечною ціллю з урахуванням форми домену судно повинно вибрати граничний відносний курс, який є дотичним до межі домену. Як показано на рис. 7.2, таких граничних курсів існує два: відносним ухиленням вправо K_{ot}^s і відносним ухиленням вліво K_{ot}^p .

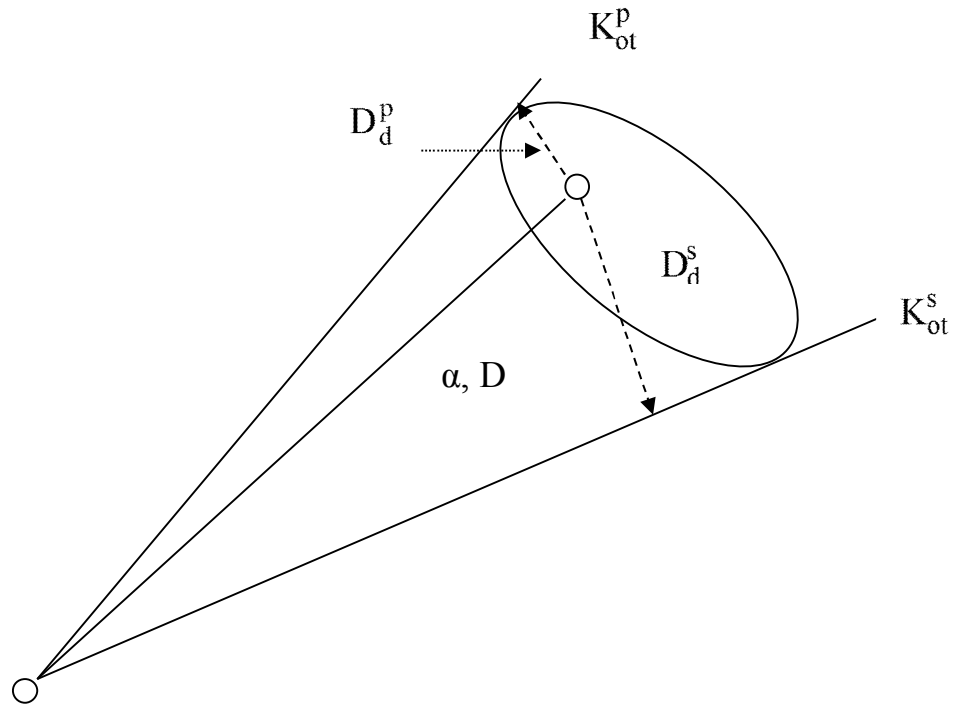


Рис. 7.2. Гранично допустимі дистанції зближення

Величина гранично допустимої дистанції зближення суден з урахуванням форми безпечної зони, очевидно, залежить від сторони відносного ухилення і визначається граничними відносними курсами K_{ot}^s та K_{ot}^p . Позначимо D_d^s та D_d^p – гранично допустимі дистанції зближення при відносному ухиленні судна відповідно вправо і вліво, як показано на рис. 7.2. З цього ж рисунку можна знайти вирази для визначення гранично допустимих дистанцій зближення:

$$D_d^s = D \left| \sin(K_{ot}^s - \alpha) \right|; \quad D_d^p = D \left| \sin(K_{ot}^p - \alpha) \right|. \quad (7.1)$$

У цьому розділі розглянемо три типи доменів, для кожного з яких необхідно знайти вирази граничних відносних курсів ухилення K_{ot}^s та K_{ot}^p з подальшою розробкою процедур розрахунку гранично допустимих дистанцій зближення D_d^s та D_d^p . Після цього може бути синтез методів розрахунку меж областей неприпустимих параметрів руху елементарної групи суден.

Спочатку розглянемо аналітичні вирази граничних відносних курсів ухилення для домену еліптичної форми, який позначимо $D_b^{(El)}$. В цьому випадку відносний курс мінімального ухилення K_{otymin} визначається дотичною до межі домену $D_b^{(El)}$, положення якої залежить від ракурсу цілі. У додатку Г.1 одержано вирази розрахунку граничних відносних курсів ухилення, які визначаються наступним чином:

$$\begin{aligned} K_{ot}^s &= \max \{ \bar{K}_{ymin1}, \bar{K}_{ymin2}, \bar{K}_{ymin3}, \bar{K}_{ymin4} \}. \\ K_{ot}^p &= \min \{ \bar{K}_{ymin1}, \bar{K}_{ymin2}, \bar{K}_{ymin3}, \bar{K}_{ymin4} \}. \end{aligned} \quad (7.2)$$

В останньому виразі:

$$\bar{K}_{ymin1} = \arctg \frac{\bar{X}_o + b \sqrt{1 - \frac{x_1^2}{a^2}} \sin K_c + x_1 \cos K_c}{\bar{Y}_o + b \sqrt{1 - \frac{x_1^2}{a^2}} \cos K_c - x_1 \sin K_c},$$

$$\bar{K}_{ymin2} = \arctg \frac{\bar{X}_o - b \sqrt{1 - \frac{x_1^2}{a^2}} \sin K_c + x_1 \cos K_c}{\bar{Y}_o - b \sqrt{1 - \frac{x_1^2}{a^2}} \cos K_c - x_1 \sin K_c},$$

$$\bar{K}_{ymin3} = \arctg \frac{\bar{X}_o + b \sqrt{1 - \frac{x_2^2}{a^2}} \sin K_c + x_2 \cos K_c}{\bar{Y}_o + b \sqrt{1 - \frac{x_2^2}{a^2}} \cos K_c - x_2 \sin K_c}, \quad (7.3)$$

$$\bar{K}_{ymin4} = \arctg \frac{\bar{X}_o - b \sqrt{1 - \frac{x_2^2}{a^2}} \sin K_c + x_2 \cos K_c}{\bar{Y}_o - b \sqrt{1 - \frac{x_2^2}{a^2}} \cos K_c - x_2 \sin K_c},$$

$$\text{де } x_1 = -\frac{a^2 cb}{a^2 + c^2 r^2} + \sqrt{\left(\frac{a^2 cb}{a^2 + c^2 r^2}\right)^2 - \frac{a^2 c^2 (b^2 - r^2)}{(a^2 + c^2 r^2)}},$$

$$x_2 = -\frac{a^2 cb}{a^2 + c^2 r^2} - \sqrt{\left(\frac{a^2 cb}{a^2 + c^2 r^2}\right)^2 - \frac{a^2 c^2 (b^2 - r^2)}{(a^2 + c^2 r^2)}},$$

$$\text{причому } c = \frac{a^2}{b(\bar{Y}_o \sin K_c - \bar{X}_o \cos K_c)} \text{ и } r = (\bar{Y}_o \cos K_c + \bar{X}_o \sin K_c).$$

Для врахування зміщення судна з центру еліпса в Додатку Г показано, що слід обчислити величини:

$$\bar{X}_o = D_o \sin \alpha_o, \quad \bar{Y}_o = D_o \cos \alpha_o,$$

$$\text{де } D_o = \sqrt{(\bar{X}_v + dL_e \sin K_c)^2 + (\bar{Y}_v + dL_e \cos K_c)^2};$$

$$\alpha_o = 360 + \bar{\alpha}_n, \text{ при } \bar{Y}_v + dL_e \cos K_c > 0;$$

$$\alpha_o = 180 + \bar{\alpha}_n, \text{ при } \bar{Y}_v + dL_e \cos K_c < 0, \text{ причому } \bar{\alpha}_n = \arctg \frac{\bar{X}_v + dL_e \cos K_c}{\bar{Y}_v + dL_e \cos K_c};$$

dL_e – відстань між центром еліпса і центром судна;

$\bar{X}_v$ та $\bar{Y}_v$ – координати цілі в опорній системі координат.

Підставляючи отримані значення $\bar{X}_o$ та $\bar{Y}_o$ в (7.3) розраховуємо значення $\bar{K}_{ymin}$ із врахуванням зміщення центру еліпса відносно обсервованого місця цілі.

Для розрахунку граничних відносних курсів ухилення за виразом (7.2) і гранично - допустимих дистанцій зближення за формулою (7.1) була розроблена комп'ютерна програма, в якій в залежності від кута $\xi = K_{ot}^s - \alpha$ проводиться розрахунок значення гранично допустимої дистанції зближення $D_d(K_c)$, як показано на рис. 7.3.

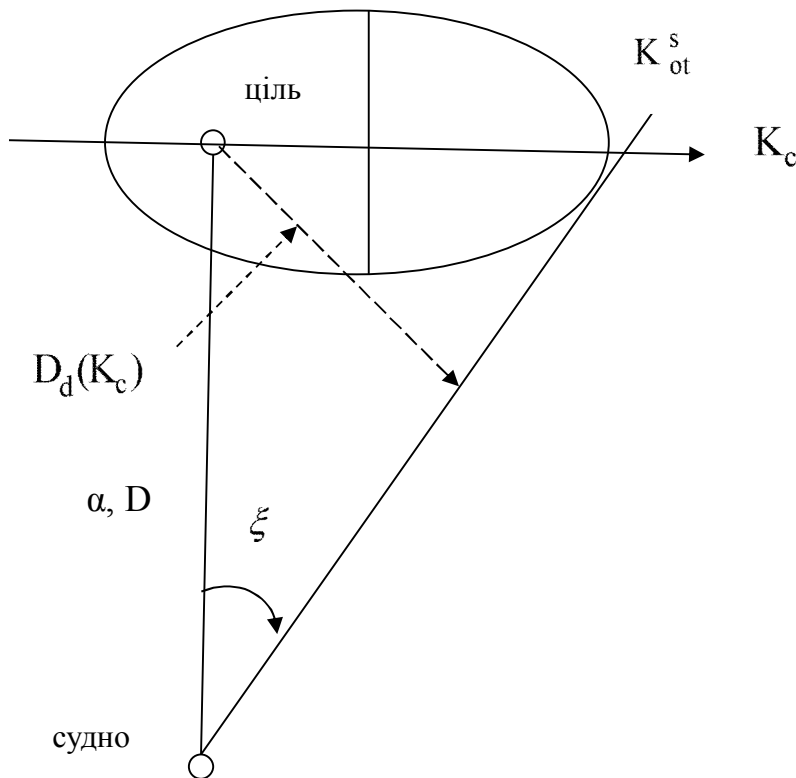


Рис. 7.3. Залежність дистанції $D_d(K_c)$ від кута ξ

За допомогою зміни пеленга від 5° до 360° програмою розраховувалися відповідні значення граничного відносного курсу ухилення K_{ot}^s і дистанції $D_d(K_c)$. Результати розрахунку представлені на рис. 7.4, в правій частині якої наведена графічна залежність гранично допустимої дистанції зближення від значення кута ξ .

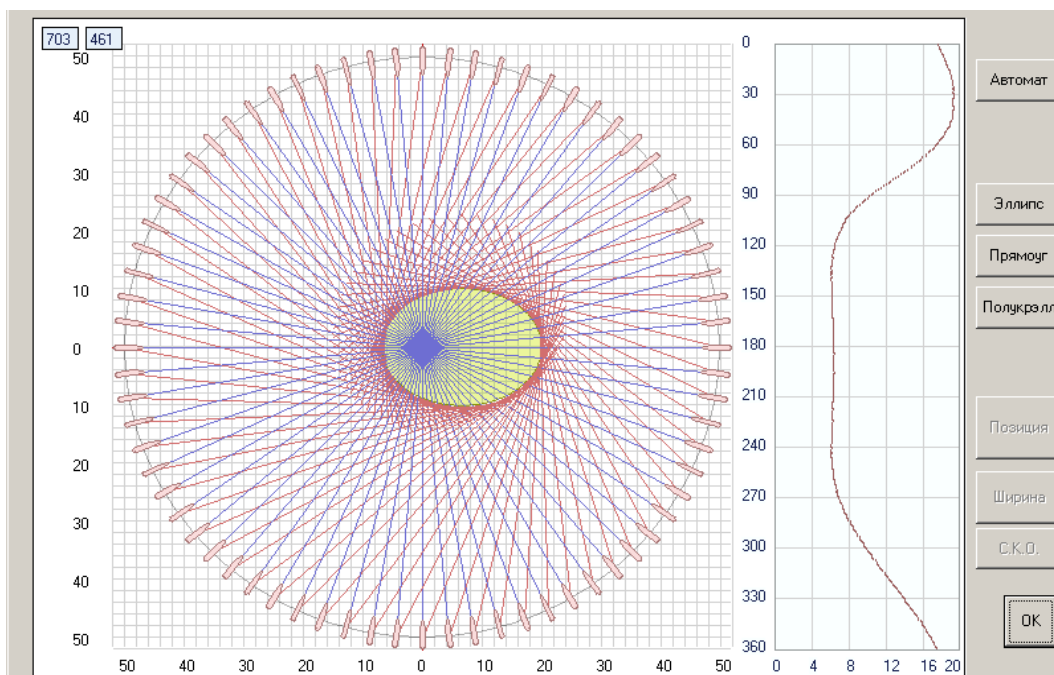


Рис. 7.4. Зміна дистанції $D_d(K_c)$ при еліптичній формі домену

Розглянемо розрахунок граничних відносних курсів ухилення для безпечного домену $D_b^{(RE)}$ складної форми, який являє собою комбінацію половини еліпса і половини кола. Як раніше вказувалося, граничний відносний курс ухилення судна є дотичною з місця судна до безпечної домену цілі. В Додатку Г.2 показано, що у загальному випадку відносний мінімальний курс ухилення судна $\bar{K}_{ymin}$:

$$\bar{K}_{ymin} = \begin{cases} K_{otn} + \arcsin \frac{R_b}{D}, & \text{если } \sin \beta < 0, \\ \max \{ \bar{K}_{ymin1}, \bar{K}_{ymin2}, \bar{K}_{ymin3}, \bar{K}_{ymin4} \}, & \text{если } \sin \beta > 0, \end{cases} \quad (7.4)$$

де $\bar{K}_{ymin1}$, $\bar{K}_{ymin2}$, $\bar{K}_{ymin3}$ и $\bar{K}_{ymin4}$ визначаються виразом (7.3).

Як і в попередньому випадку розгляду домену еліптичної форми розробленою комп'ютерною програмою був проведений розрахунок граничних відносних курсів і значень гранично допустимої дистанції зближення $D_d(K_c)$ для домену $D_b^{(RE)}$ складної форми, характер зміни якої в залежності від пеленга показаний на рис. 7.5.

Аналітичні вирази розрахунку граничних відносних курсів ухилення для безпечного домену $D_b^{(Rt)}$ прямокутної форми, який доцільно завдавати відносно центру цілі чотирма кутовими точками А, В, С і D (рис. 7.6), формуються наступним чином.

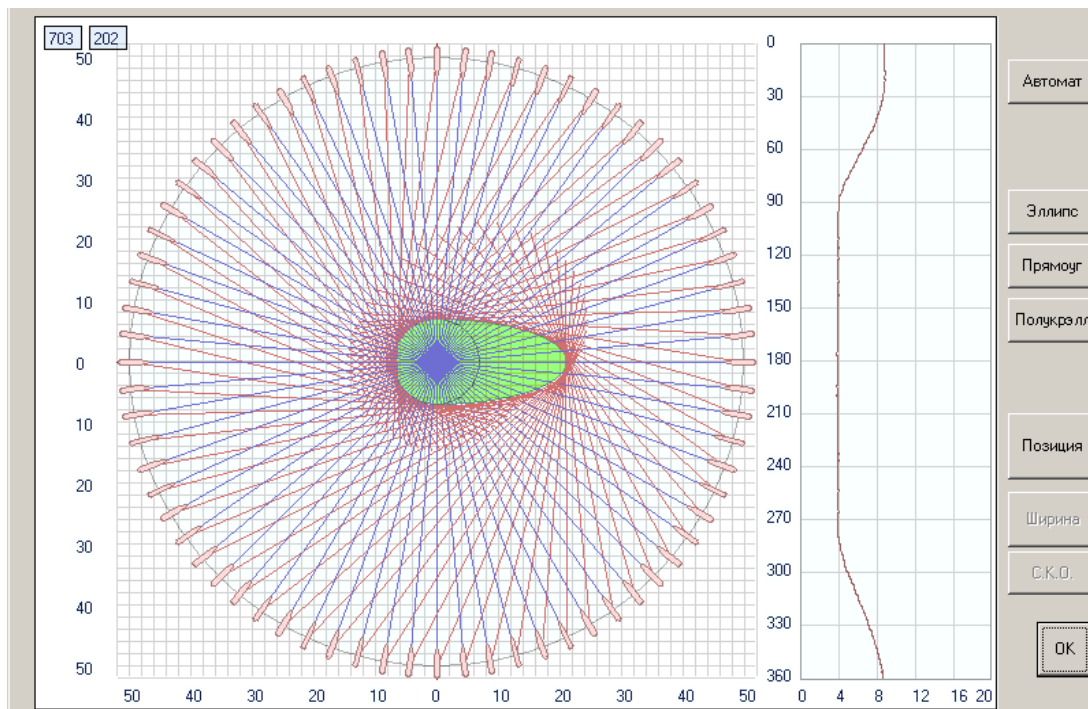


Рис. 7.5. Зміна дистанції $D_d(K_c)$ домену $D_b^{(RE)}$ складної форми

Положення кутових точок А, В, С та D відносно центру будемо задавати дистанціями D_n , D_k і кутами ψ_n , ψ_k , причому, як впливає з рис. 7.6:

$$\psi_n = \arctg \frac{b}{2l_n}, \quad \psi_k = \arctg \frac{b}{2l_k},$$

$$D_n = \sqrt{\frac{b^2}{4} + l_n^2}, \quad D_k = \sqrt{\frac{b^2}{4} + l_k^2}.$$

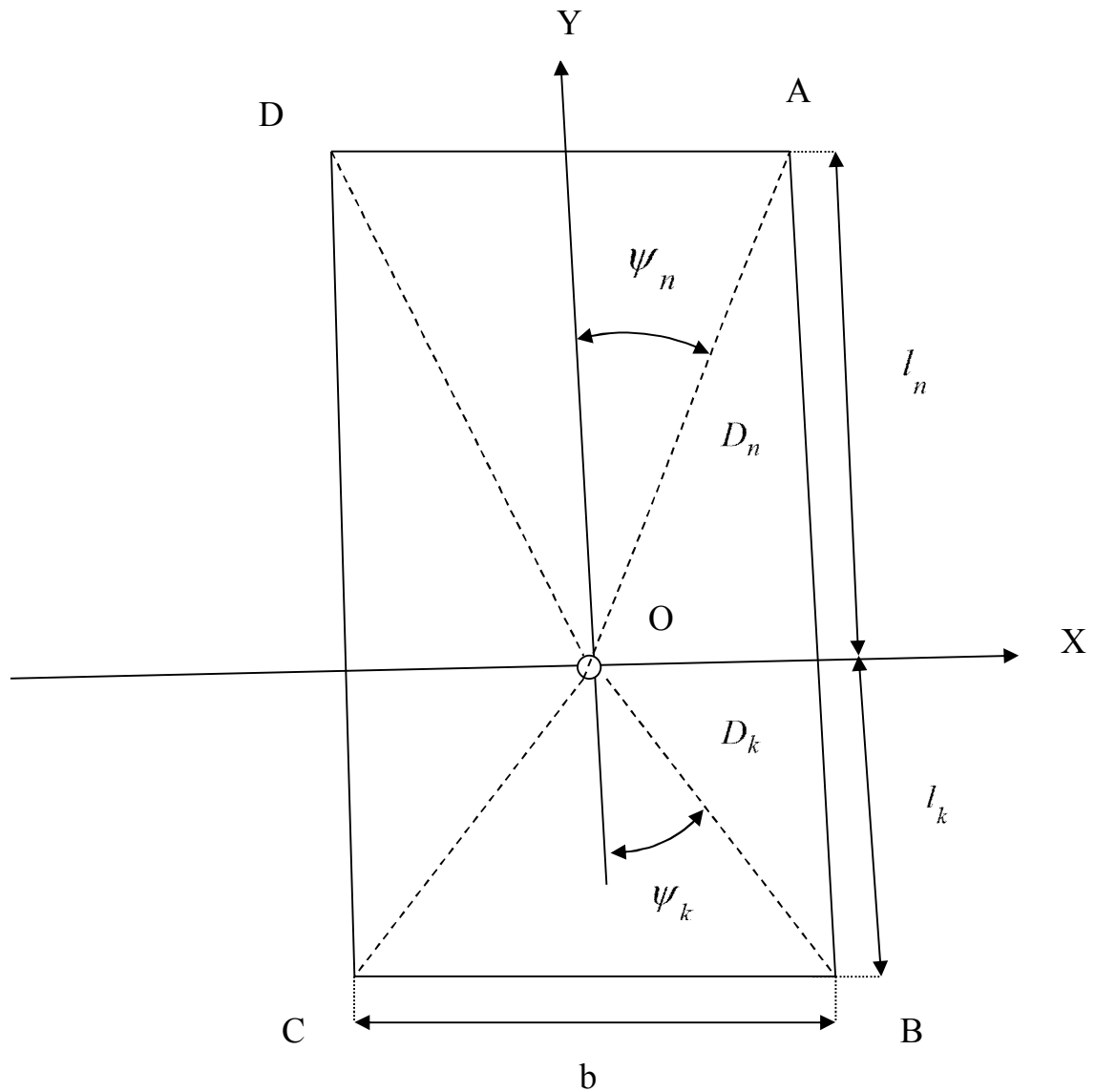


Рис. 7.6. Параметри домену $D_b^{(Rt)}$ прямокутної форми

Положення кутових точок А, В, С та D відносно центру будемо задавати дистанціями D_n , D_k і кутами ψ_n , ψ_k , причому, як впливає з рис. 7.6:

$$\psi_n = \arctg \frac{b}{2l_n}, \psi_k = \arctg \frac{b}{2l_k},$$

$$D_n = \sqrt{\frac{b^2}{4} + l_n^2}, D_k = \sqrt{\frac{b^2}{4} + l_k^2}.$$

Як показано в Додатку Г.3, граничні відносні курси ухилення $\bar{K}_{yminI}$ для безпечного домену $D_b^{(Rt)}$ прямокутної форми розраховуються за допомогою формул:

$$\begin{aligned} \tilde{K}_{yminI} &= 360 + \bar{K}_{yminI}, \text{ при } \bar{Y}_I > 0; (I = A, B, C, D) \\ \tilde{K}_{yminI} &= 180 + \bar{K}_{yminI}, \text{ при } \bar{Y}_I < 0, \end{aligned} \quad (7.5)$$

де $\bar{K}_{yminI}$ визначається наступним чином:

$$\bar{K}_{yminA} = \arctg \frac{\bar{X}_o + D_n \sin(\psi_n + K_c)}{\bar{Y}_o + D_n \cos(\psi_n + K_c)},$$

$$\bar{K}_{yminB} = \arctg \frac{\bar{X}_o + D_k \sin(\pi - \psi_k + K_c)}{\bar{Y}_o + D_k \cos(\pi - \psi_k + K_c)},$$

$$\bar{K}_{yminC} = \arctg \frac{\bar{X}_o + D_k \sin(\pi + \psi_k + K_c)}{\bar{Y}_o + D_k \cos(\pi + \psi_k + K_c)},$$

$$\bar{K}_{yminD} = \arctg \frac{\bar{X}_o + D_n \sin(2\pi - \psi_n + K_c)}{\bar{Y}_o + D_n \cos(2\pi - \psi_n + K_c)}.$$

Використовуючи отримані вирази, за допомогою формули (7.5) знаходимо значення відносних мінімальних курсів ухилення $\tilde{K}_{yminA}$, $\tilde{K}_{yminB}$, $\tilde{K}_{yminC}$,

$\tilde{K}_{yminD}$. Для вибору граничних відносних курсів ухилення K_{ot}^s та K_{ot}^p скористаємося наступними співвідношеннями:

$$K_{ot}^s = \max \{ \tilde{K}_{yminA}, \tilde{K}_{yminB}, \tilde{K}_{yminC}, \tilde{K}_{yminD} \}.$$

$$K_{ot}^p = \min \{ \tilde{K}_{yminA}, \tilde{K}_{yminB}, \tilde{K}_{yminC}, \tilde{K}_{yminD} \}.$$

Для домену $D_b^{(Rt)}$ прямокутної форми комп'ютерною програмою були розраховані граничні відносні курси і значення гранично - допустимої дистанції зближення $D_d(K_c)$, характер зміни якої в залежності від пеленга показаний на рис. 7.7.

Таким чином, розроблені процедури визначення граничних відносних курсів і значень гранично допустимої дистанції зближення $D_d(K_c)$, яка визначає області неприпустимих значень параметрів руху суден.

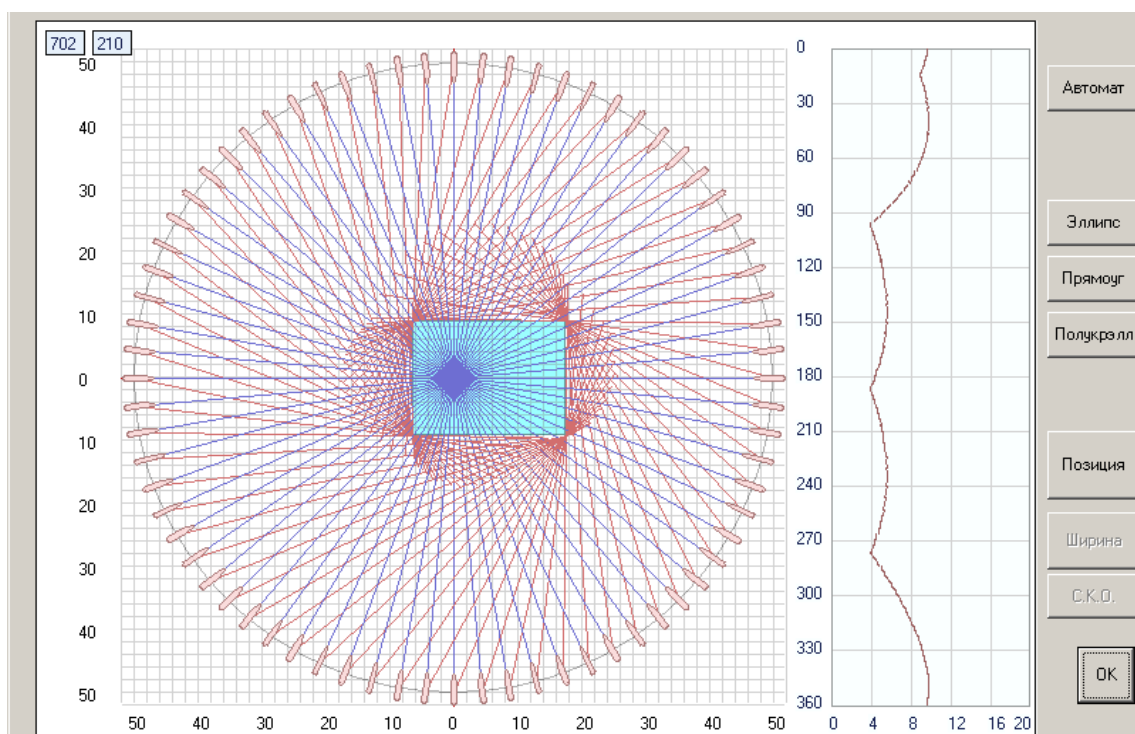


Рис. 7.7. Зміна дистанції $D_d(K_c)$ домену $D_b^{(Rt)}$ прямокутної форми

Тому, використовуючи отримані результати, розробимо способи формування областей неприпустимих значень, що містять курс одного або обох суден, тобто області неприпустимих значень курсів одного судна і швидкостей другого судна, а також області неприпустимих значень курсів елементарної групи суден.

7.2. Формування області неприпустимих значень курсів суден в нестандартних аналітичних системах попередження зіткнення суден з доменом еліптичної і складної форми

У загальному випадку межа області S_{Dij} неприпустимих значень курсів суден, як показано в четвертому розділі, визначається залежністю курсу першого судна K_1 від курсу другого K_2 з урахуванням співвідношення швидкостей суден V_1 та V_2 , тобто $\rho = \frac{V_2}{V_1}$.

У разі $V_1 < V_2$ межа області S_{Dij} визначається залежністю:

$$K_1 = \gamma + \arcsin\{\rho[\sin(K_2 - \gamma)]\},$$

причому $K_2 \in \{S_1 \cup S_2\}$, де

$$S_1 = [\gamma + 2\pi - \arcsin(\rho^{-1}), \gamma + \arcsin(\rho^{-1})],$$

$$S_2 = [\gamma + \pi - \arcsin(\rho^{-1}), \gamma + \pi + \arcsin(\rho^{-1})].$$

За рівності швидкостей суден елементарної групи $V_1 = V_2$ вираз для межі області S_{Dij} має такий вигляд:

$$K_1 = \pi + 2\gamma - K_2,$$

а в разі $V_1 > V_2$ межа області S_{Dij} має наступний аналітичний вираз:

$$K_1 = \gamma + \arcsin\{\arcsin(K_2 - \gamma)\},$$

причому $K_2 \in [0, 2\pi]$.

Наведені вирази межі області S_{Dij} містять кут γ , який визначається формулою:

$$\gamma = \alpha \pm \arcsin \frac{D_d}{D},$$

в якій для нестандартних аналітичних систем попередження зіткнення суден гранично допустима дистанція зближення не є постійною, а залежить від пеленга і курсу другого судна, тобто $D_d(\alpha, K_2)$. Тому розрахунок межі області S_{Dij} для нестандартних аналітичних систем проводиться за наступним алгоритмом. З огляду на те, що незалежною перемінною є K_2 , для заданого значення K_2 з урахуванням параметрів початкової ситуації зближення розраховується граничний відносний курс ухилення K_{ot}^s , за яким проводиться обчислення гранично допустимої дистанції зближення $D_d(\alpha, K_2)$. Черговим кроком алгоритму є обчислення кута γ , після чого розраховується значення курсу K_1 в залежності від співвідношення швидкостей суден V_1 та V_2 .

Розрахунок граничного відносного курсу ухилення K_{ot}^s для домену еліптичної форми проводиться за допомогою виразу (7.2), для домену складної форми – за допомогою виразу (7.4) і для домену прямокутної форми відносний курс ухилення визначається формулою (7.5).

Для розрахунку меж і формування області S_{Dij} неприпустимих значень курсів суден при використанні доменів еліптичної і прямокутної форми була розроблена комп'ютерна програма, причому програма містить модуль аналізу

коректності маневру розходження, отриманого за допомогою області S_{Dij} . В даному підрозділі розглянемо нестандартну аналітичну систему, яка використовує еліптичний домен. Як раніше вказувалося, процедура формування області S_{Dij} є різною в разі різних і рівних швидкостей суден елементарної групи.

Спочатку розглянемо ситуацію різних швидкостей суден, вважаючи, що $V_1 > V_2$. Вибираємо в якості прикладу ситуацію небезпечного зближення, показану на рис. 7.8, на якому наведені її параметри. На рис. 7.9 показана область S_{Dij} побудована для еліптичного домену, велика вісь якого дорівнює 1 милі, а мала – $2/3$ милі. Як впливає з наведеного рисунка, точка, яка відповідає початковим курсам суден, знаходиться в області S_{Dij} , що свідчить про небезпечне зближення і необхідність вибору маневру розходження. З цією метою на верхній межі області S_{Dij} (рис. 7.10), що відповідає відносному ухиленню вправо, обрана точка з курсами $K_1 = 146^\circ$ та $K_2 = 218^\circ$, яка є маневром розходження.

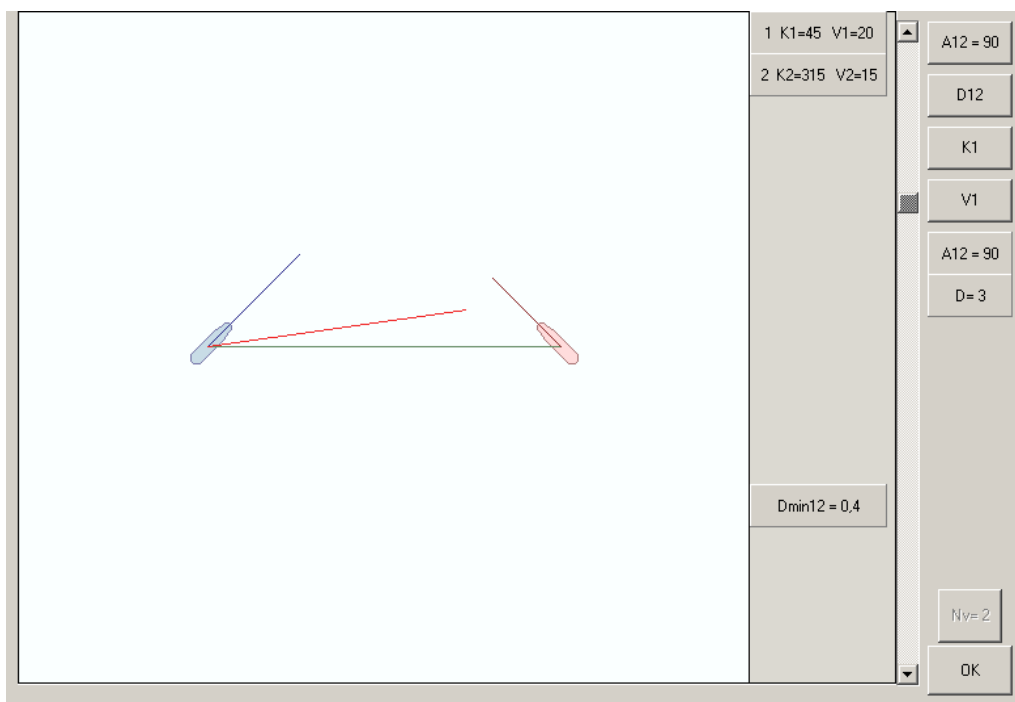


Рис. 7.8. Ситуація небезпечного зближення суден при $V_1 > V_2$

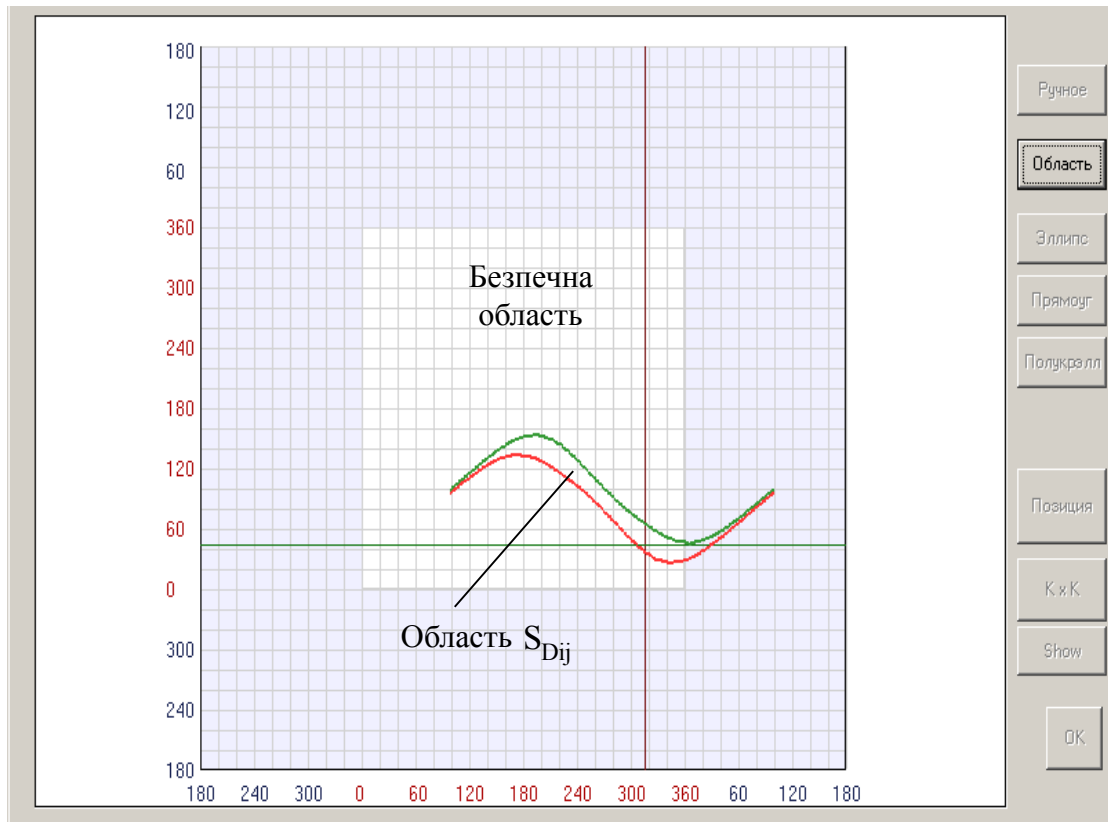


Рис. 7.9. Область S_{Dij} еліптичного домену при $V_1 > V_2$

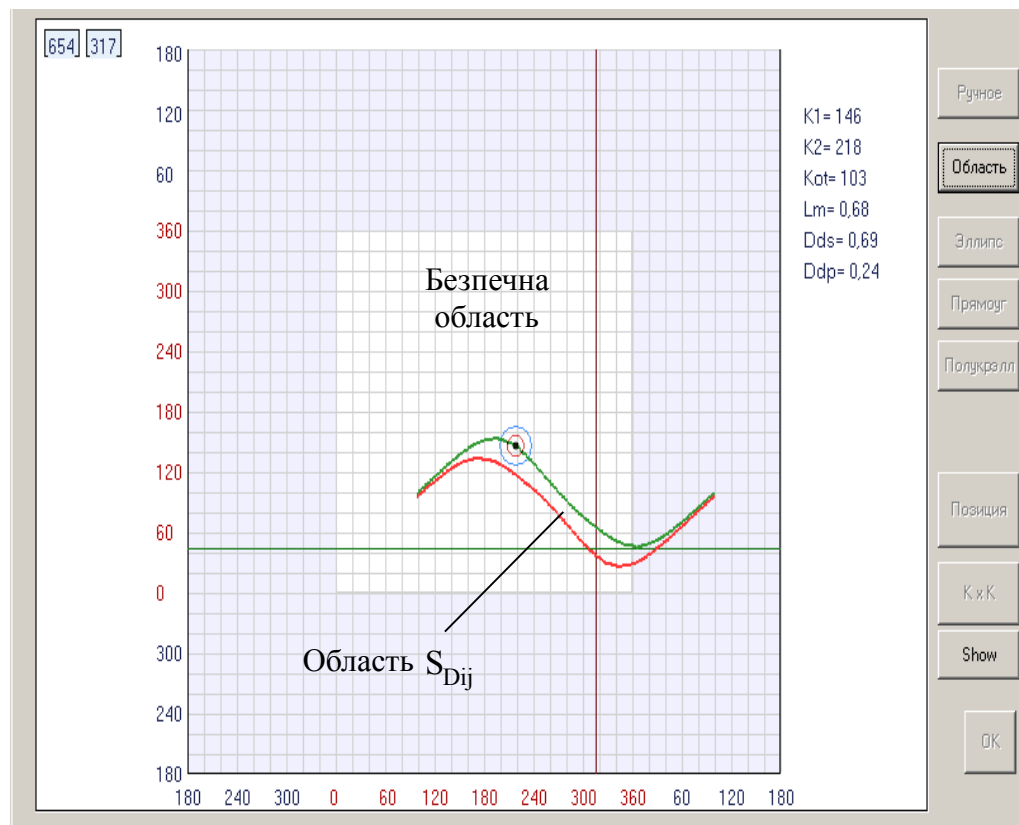


Рис. 7.10. Вибір маневру розходження відносним ухиленням вправо

Звертаємо увагу, що при цьому маневрі розходження, позначеному на межі області S_{Dij} концентричними колами, дистанція найкоротшого зближення $L_m = 0,68$ милі і дорівнює гранично допустимій дистанції ухилення вправо D_{ds} . На рис. 7.11 показано, що цьому маневру відповідає лінія відносного курсу, яка є дотичною до еліптичного домену.

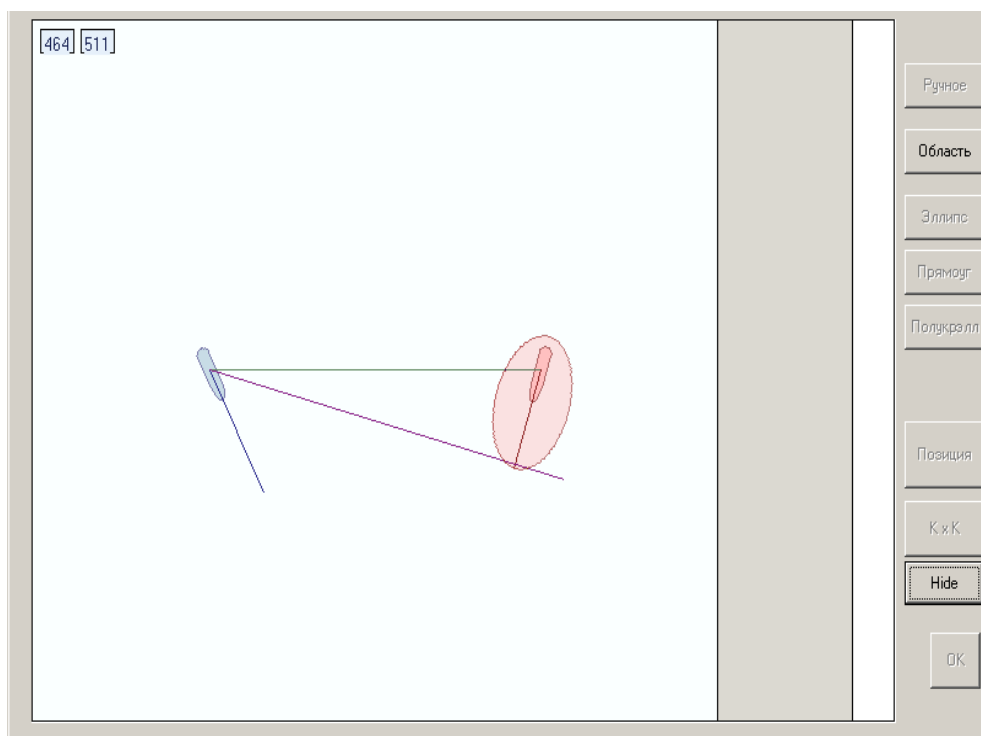


Рис. 7.11. Аналіз маневру розходження відносним ухиленням вправо

У Додатку Г.4 наведені інші маневри розходження для приведеної ситуації небезпечного зближення одержані за допомогою сформованої області S_{Dij} .

Розглянемо процедуру формування області S_{Dij} в ситуації небезпечного зближення при рівних швидкостях обох суден, тобто $V_1 = V_2$. Для цього випадку розглянемо ситуацію небезпечного зближення, наведену на рис. 7.12. Параметри цієї ситуації зазначені на тому ж рисунку. Область S_{Dij} для $V_1 = V_2$ відображена на рис. 7.13.

На рис. 7.14 показаний вибір маневру розходження відносним ухиленням

вправо збільшенням курсів обох суден, причому результати аналізу коректності обраного маневру розходження представлені на рис. 7.15.

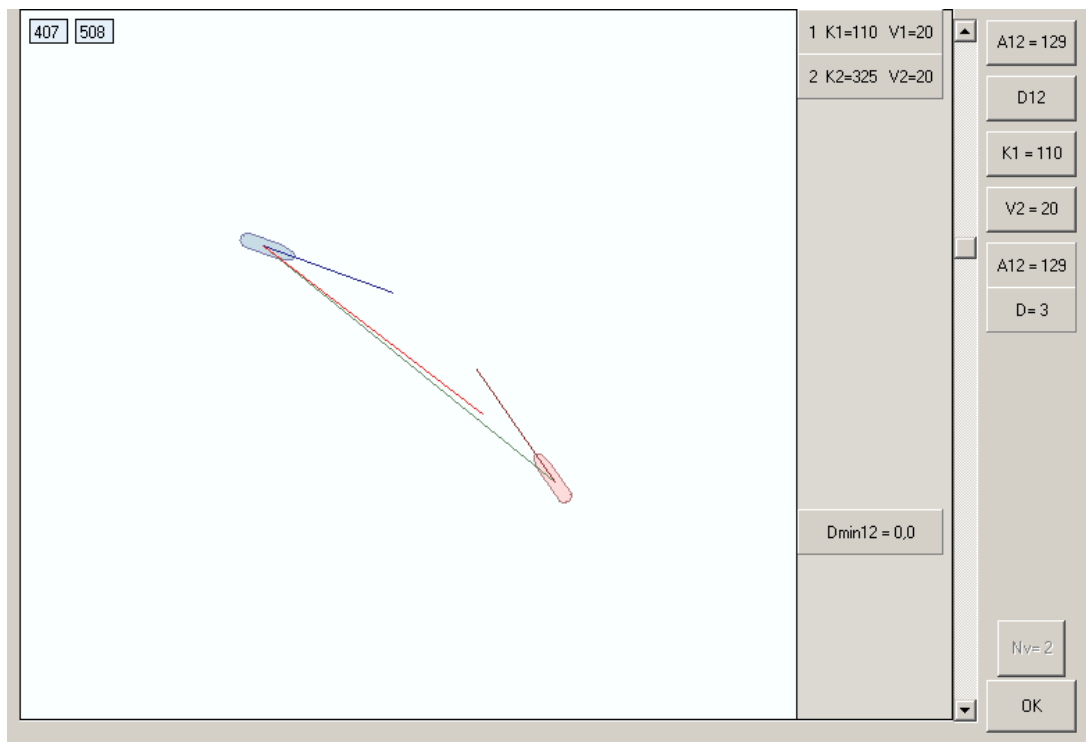


Рис. 7.12. Ситуація небезпечного зближення суден при $V_1 = V_2$

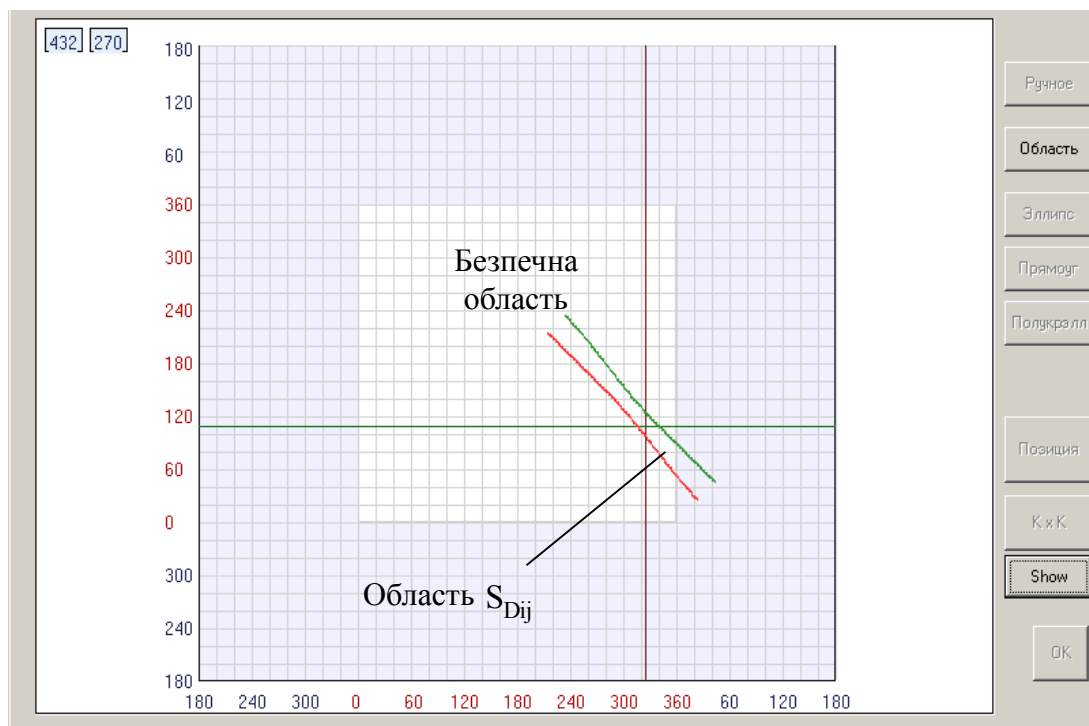


Рис. 7.13. Область S_{Dij} еліптичного домену при $V_1 = V_2$

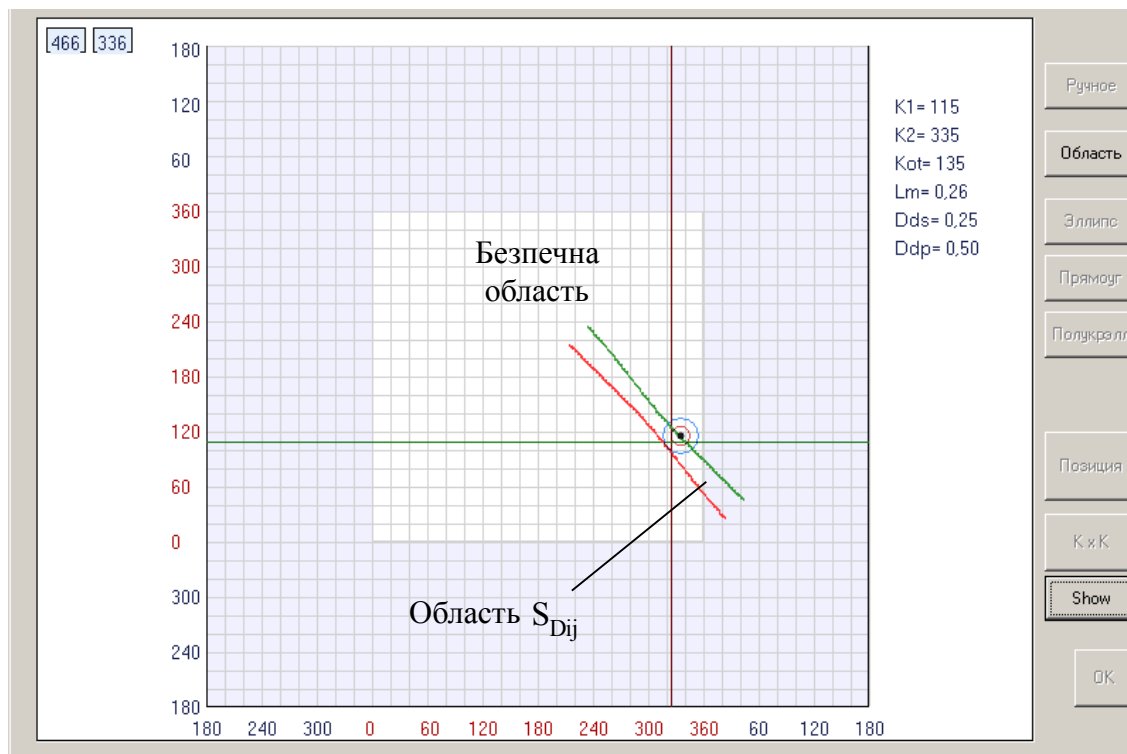


Рис. 7.14. Вибір маневру розходження відносним ухиленням вправо

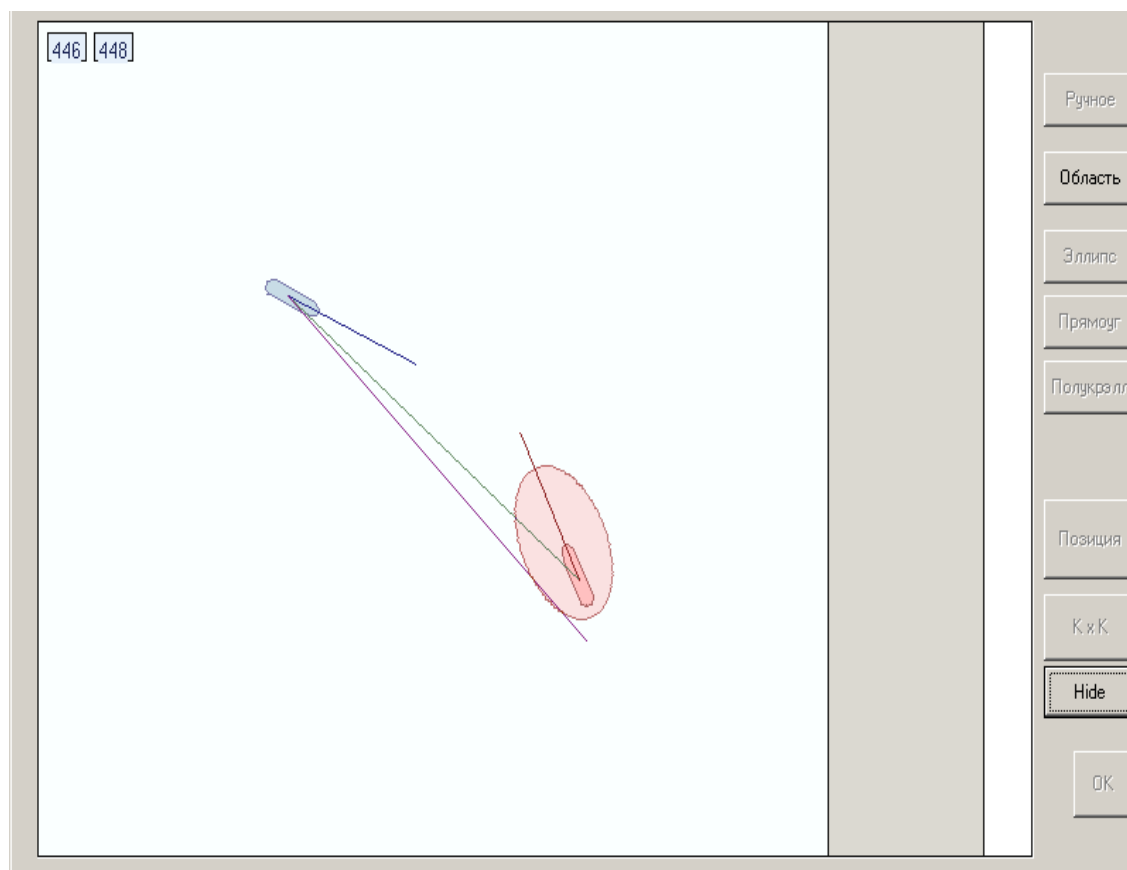


Рис. 7.15. Результати перевірки коректності маневру ухиленням вправо

Додаток Г.5 містить додаткові маневри розходження для приведеної ситуації небезпечного зближення в разі $V_1 = V_2$, які одержані з допомогою сформованої області S_{Dij} .

Формування області неприпустимих значень курсів S_{Dij} для домену складної форми (півколо - напівеліпс) аналогічне домену еліптичної форми, тільки при розрахунку граничного відносного курсу ухилення K_{ot}^s домену складної форми використовуються вирази (7.4). Тому розглядати окремо формування області неприпустимих значень курсів S_{Dij} для домену складної форми недоцільно.

7.3. Розрахунок межі області неприпустимих значень курсів суден при використанні прямокутного домену в нестандартних аналітичних системах попередження зіткнення

В даному підрозділі розглянемо використання домену прямокутної форми довжиною 1,1 милі і шириною 0,61 милі для розрахунку меж області S_{Dij} за допомогою виразів (7.5), реалізованих в комп'ютерній програмі. Спочатку досліджуємо випадок різних швидкостей суден елементарної групи, для чого розглянемо ситуацію небезпечного зближення, показану на рис. 7.16. Відповідна область S_{Dij} відображена на рис. 7.17. Вибір безпечного маневру розходження відносним ухиленням вправо мінімальним збільшенням курсів суден показаний на рис. 7.18. На рис. 7.19 підтверджена коректність маневру відносним ухиленням вправо.

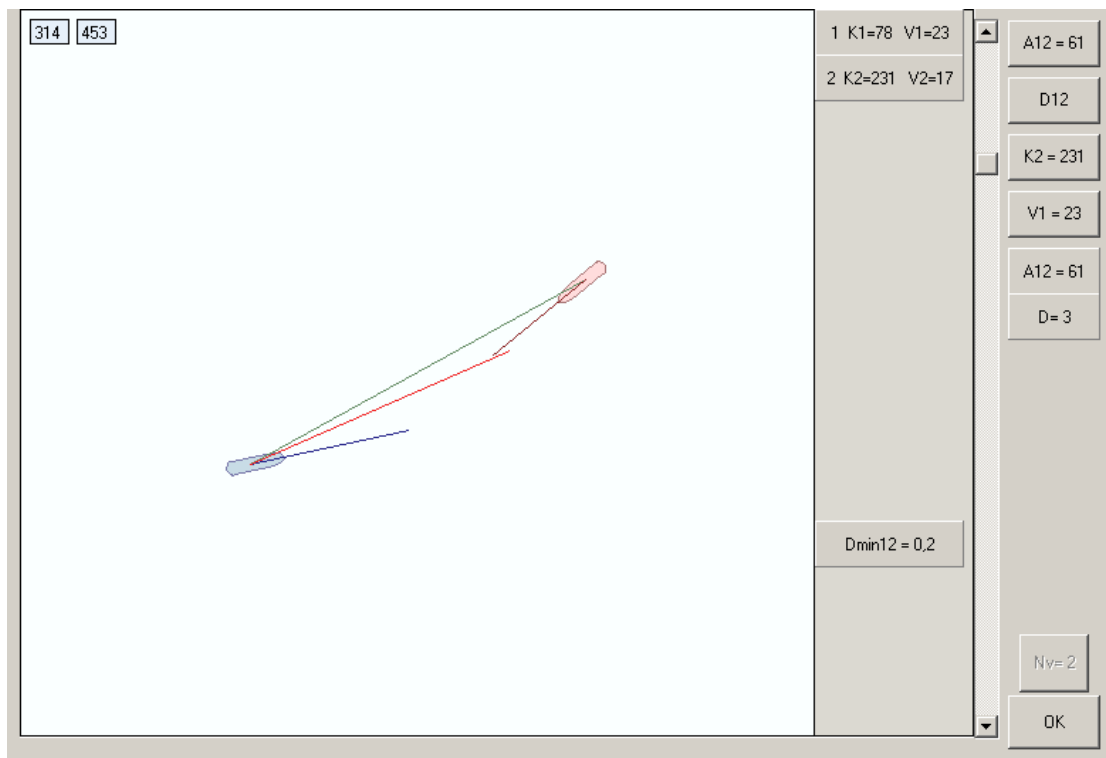


Рис. 7.16. Ситуація небезпечного зближення суден при $V_1 \neq V_2$

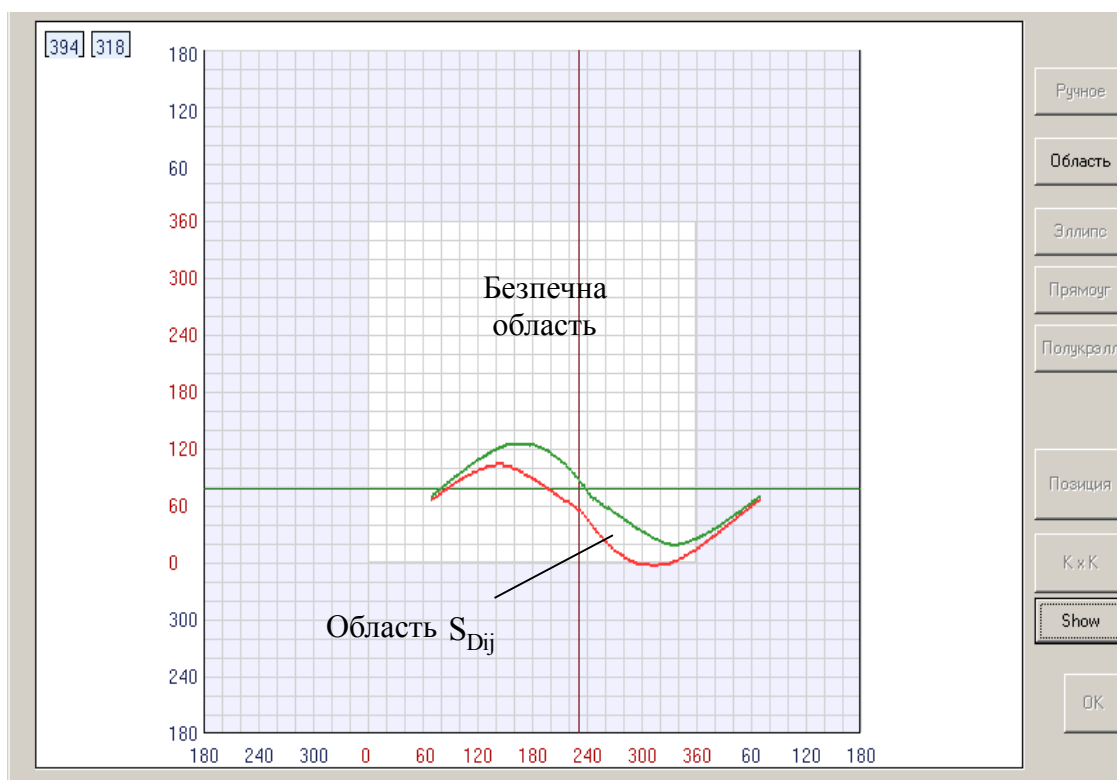


Рис. 7.17. Область S_{Dij} прямокутного домену при $V_1 > V_2$

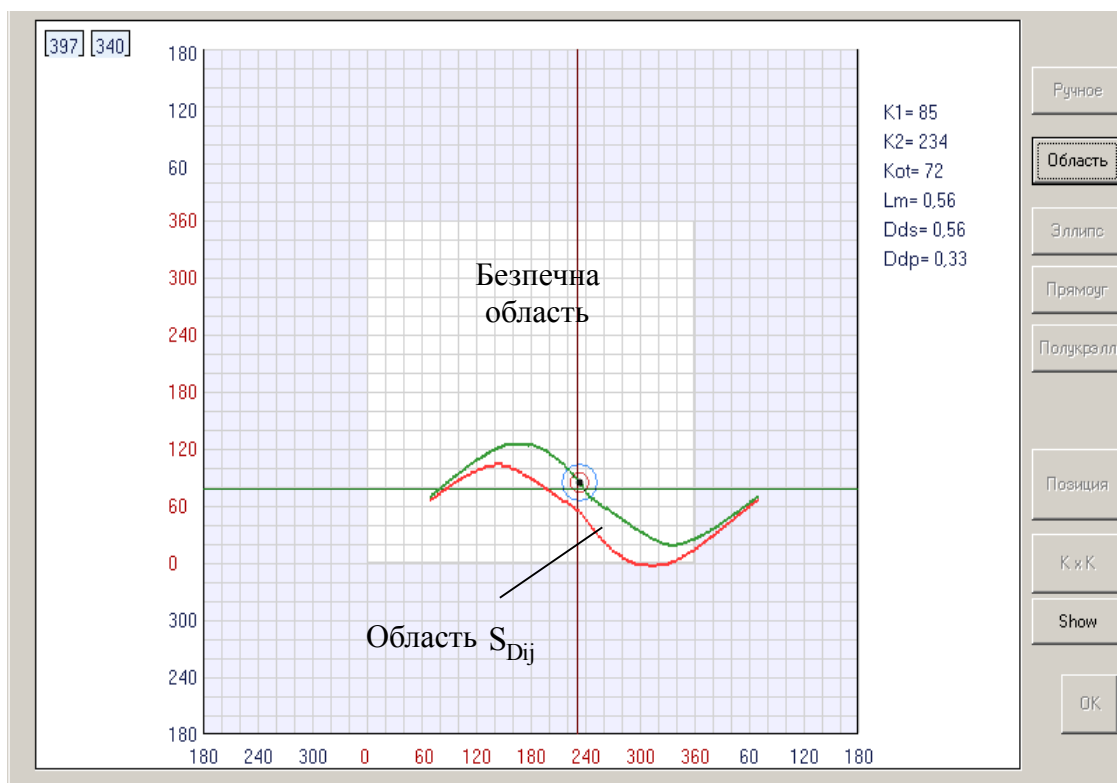


Рис. 7.18. Вибір маневру розходження мінімальним ухиленням вправо

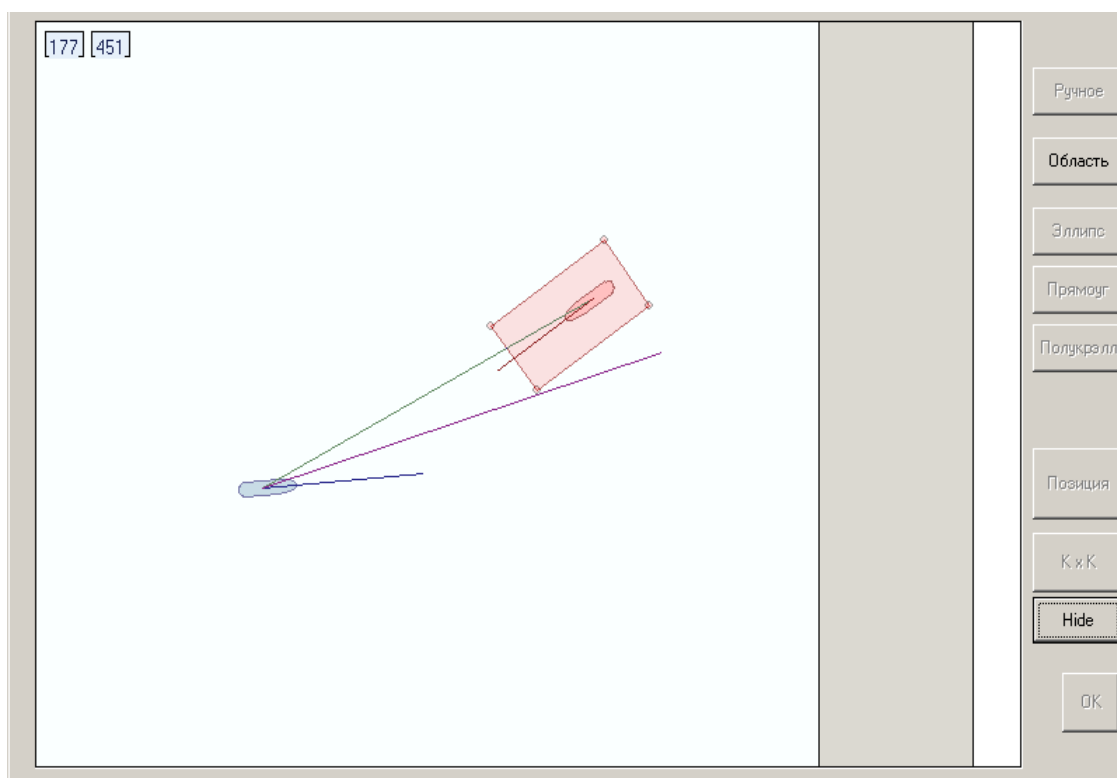


Рис. 7.19. Результати перевірки коректності маневру ухиленням вправо

Додаток Г.6 містить додаткові маневри розходження для приведеної ситуації небезпечного зближення в разі $V_1 > V_2$, які визначені з допомогою сформованої області S_{Dij} прямокутного домену.

Розглянемо процедуру формування області S_{Dij} в ситуації небезпечного зближення при однакових швидкостях обох суден, тобто $V_1 = V_2$. На рис. 7.20 для цього випадку показана ситуація небезпечного зближення, причому її параметри вказані на тому ж рисунку. Відповідна область S_{Dij} для $V_1 = V_2$ відображена на рис. 7.21.

На рис. 7.22 показаний вибір маневру розходження відносним ухиленням вправо мінімальним збільшенням курсів обох суден, причому результати аналізу коректності обраного маневру розходження представлені на рис. 7.23.

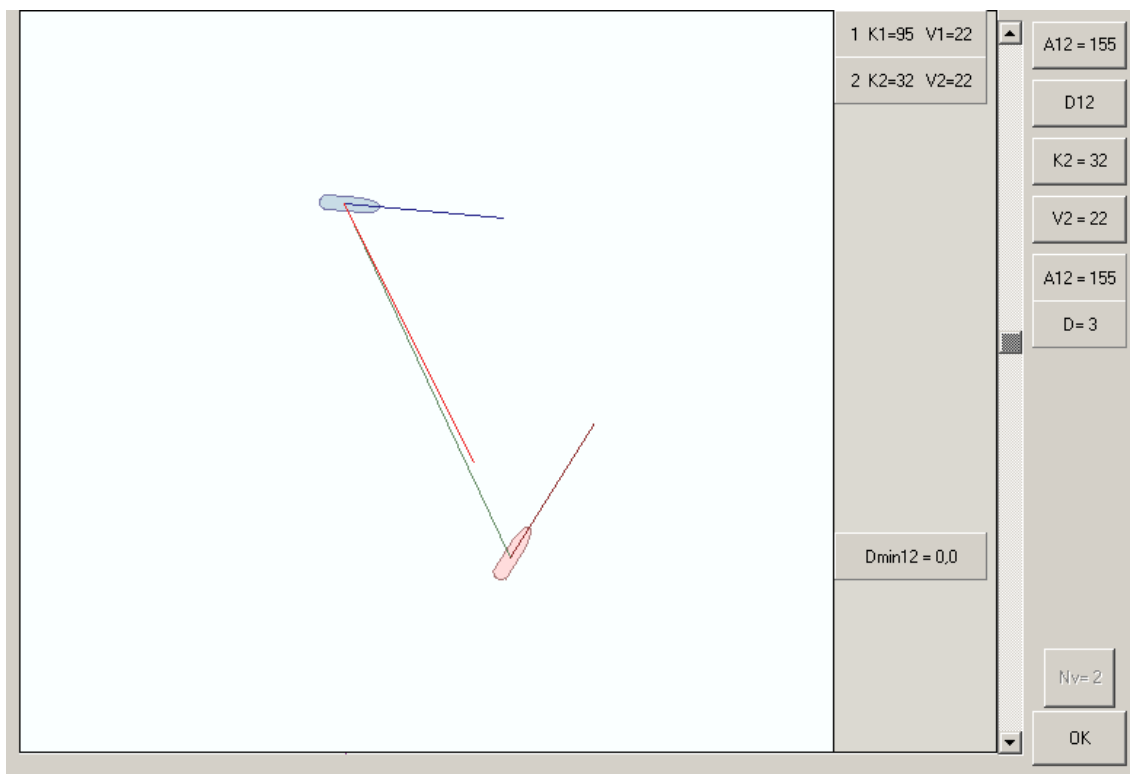


Рис. 7.20. Ситуація небезпечного зближення суден при $V_1 = V_2$

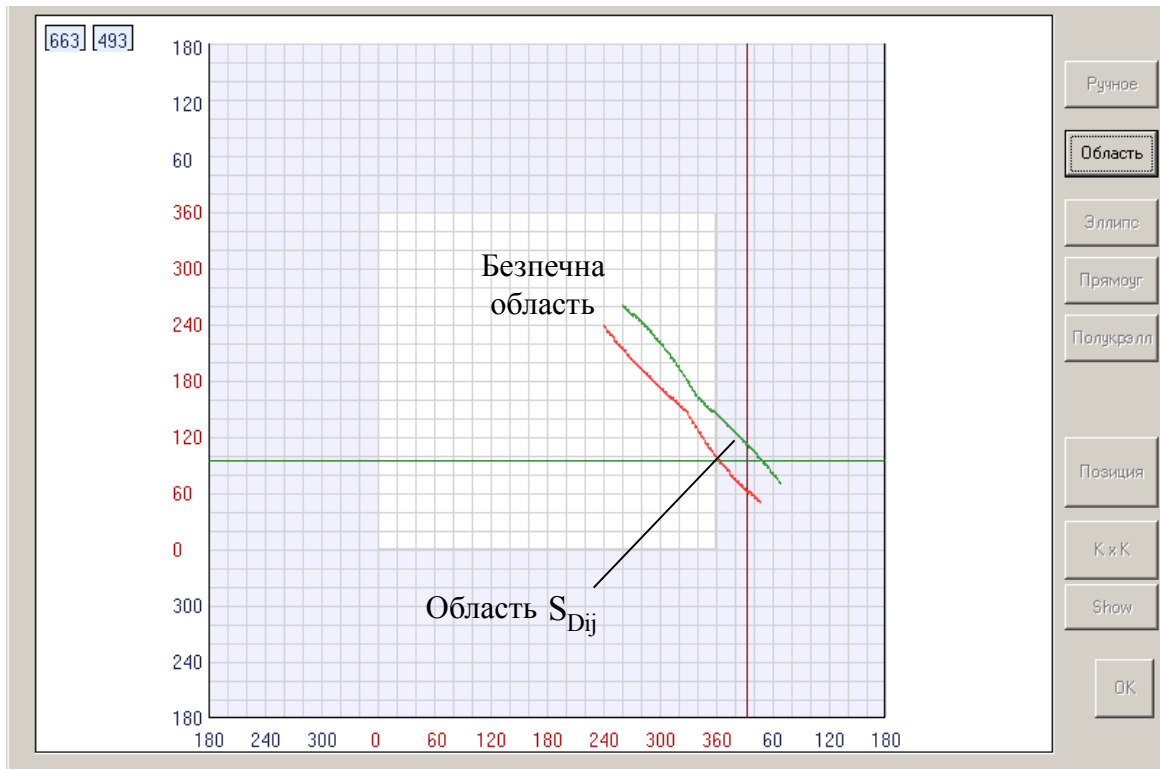


Рис. 7.21. Область S_{Dij} прямокутного домену при $V_1 = V_2$

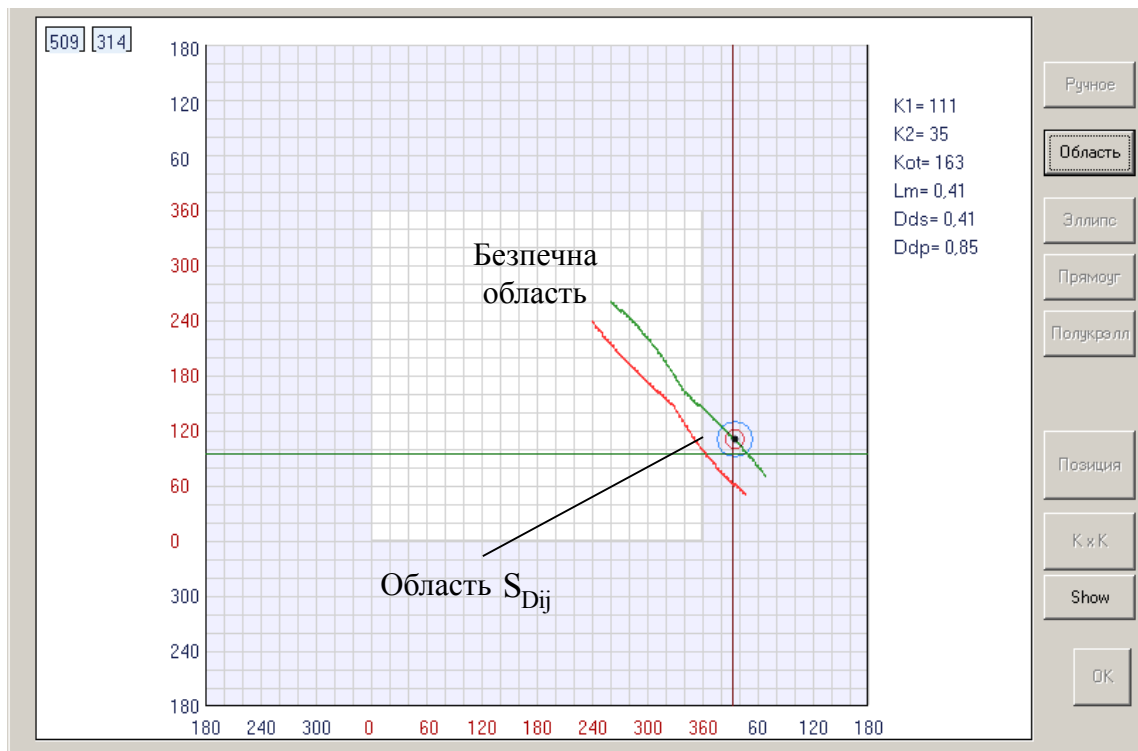


Рис. 7.22. Вибір маневру розходження відносним ухиленням вправо

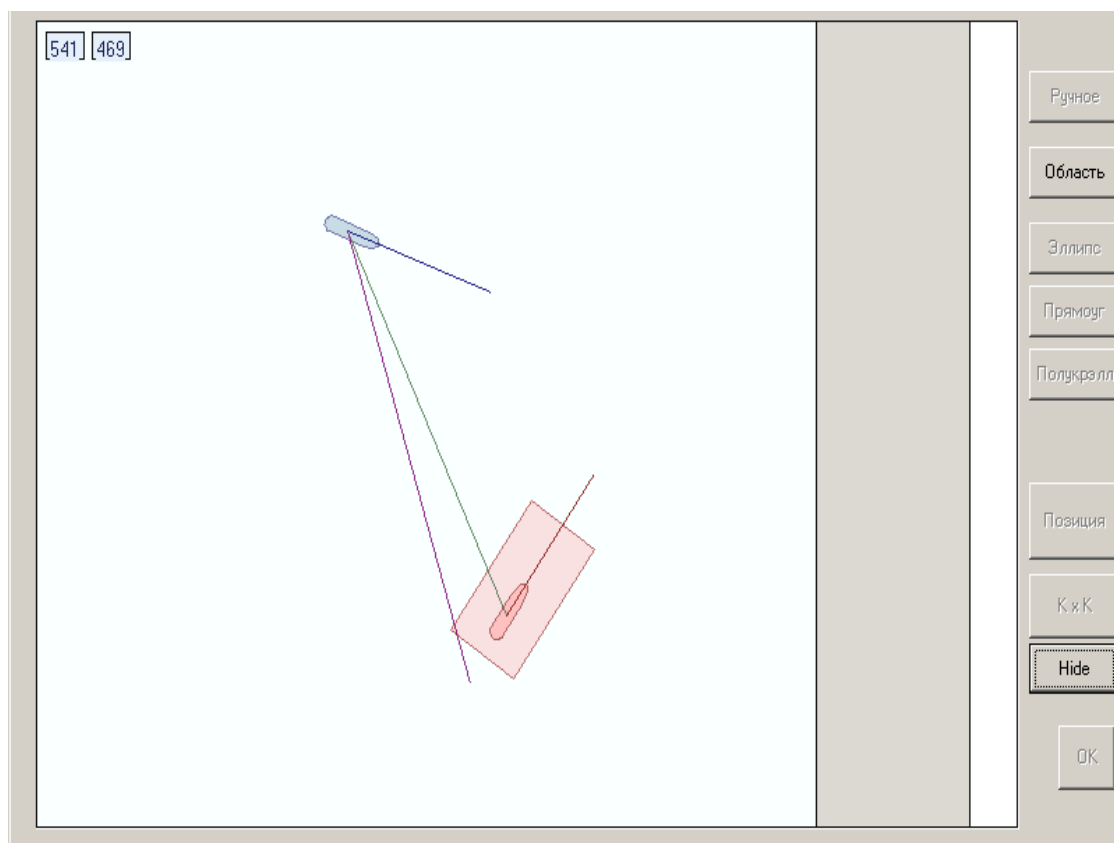


Рис. 7.23. Результати перевірки коректності маневру ухиленням вправо

При спільному маневрі зміни курсу першого судна і швидкості другого судна, враховуючи, що курс другого судна не змінюється, гранично допустимі дистанції зближення залишаються незмінними при розрахунку меж області, тому процедура формування області неприпустимих значень курсів першого судна і швидкостей другого судна при еліптичній і прямокутній формах домену аналогічна домену кругової форми.

7.4. Перевірка коректності результатів дисертаційної роботи імітаційним моделюванням

Для перевірки коректності одержаних в роботі методів попередження зіткнення суден була розроблена комп'ютерна імітаційна програма, яка складається із двох основних модулів. Перший модуль містить процедури форму-

вання областей неприпустимих параметрів руху суден і визначення з їх допомогою маневру розходження. Другий модуль призначений для імітаційного моделювання процесів розходження суден, параметри якого визначаються першим модулем комп'ютерної імітаційної програми.

Результати імітаційного моделювання приведені в Додатку Д. Причому аналіз коректності методів визначення маневру розходження за допомогою області неприпустимих значень курсів суден приведено в Додатку Д.1. Спочатку розглянуто методи формування області неприпустимих значень курсів суден стандартної аналітичної системи попередження зіткнень суден та визначення маневру розходження суден з їх допомогою. Як раніше відмічалось, для стандартної аналітичної системи характерно, те, що використовується домен круглої форми.

Результати перевірки імітаційним моделюванням коректності методів формування області неприпустимих значень швидкостей суден і вибору з її допомогою оптимального маневру розходження представлені в Додатку Д.2, в якому розглянуто імітацію маневру розходження зниженням швидкості суден для декількох ситуацій небезпечного зближення суден.

В роботі виконувалось імітаційне моделювання процесу розходження з використанням області неприпустимих значень курсів першого судна і швидкостей другого судна. Для імітаційного моделювання процесу розходження з використанням області неприпустимих значень курсів першого судна і швидкостей другого судна розрахунок параметрів маневру розходження проводиться із врахуванням моделі обертального руху першого судна з постійною кутовою швидкістю, а для моделювання руху другого судна були використані математичні моделі активного та пасивного гальмування.

Результати імітаційного моделювання процесу розходження з використанням області неприпустимих значень курсів першого судна і швидкостей другого судна розміщені в Додатку Д.3.

Імітаційне моделювання процесу розходження з використанням області неприпустимих значень курсів суден нестандартної аналітичної системи по-

передження зіткнень суден.

В Додатку Д.4 викладено результати перевірки коректності вибору маневру розходження пари суден зміною їх курсів при використанні нестандартної аналітичної системи попередження зіткнень суден в разі реалізації доменів еліптичної і прямокутної форми. В згаданому додатку проаналізовано нестандартну аналітичну систему попередження зіткнень суден з доменом еліптичної форми.

Перевірку коректності вибору маневру розходження в разі використання нестандартної аналітичної системи попередження зіткнень суден з доменом прямокутної форми розглянуто в Додатку Д.5, для чого було використано відповідний модуль імітаційної програми.

7.5. Висновки за сьомим розділом

У розділі запропоновані аналітичні методи попередження зіткнення суден, домени яких мають еліптичну, прямокутну і складну форми.

Отримано аналітичні вирази для залежностей гранично допустимої дистанції зближення від параметрів ситуації зближення і форми безпечного домену. Наведено чисельні приклади залежностей для різних форм домену.

Розроблено процедуру формування області неприпустимих значень курсів суден в нестандартних аналітичних системах попередження зіткнення суден з доменом еліптичної і складної форми. Показано, що для даних форм домену процедури можуть бути аналогічними.

Запропоновано спосіб підрахунку межі області неприпустимих значень курсів суден при використанні прямокутного домену в нестандартних аналітичних системах попередження зіткнення суден. Наведено чисельні приклади формування областей для різних ситуацій небезпечного зближення з урахуванням співвідношення швидкостей суден елементарної групи.

Здійснена перевірка коректності результатів дисертаційної роботи іміта-

ційним моделюванням. Проведено аналіз коректності методів формування області неприпустимих значень курсів суден за допомогою імітаційного моделювання, який показав позитивний результат перевірки.

Виконана перевірка імітаційним моделюванням коректності методів формування області неприпустимих значень швидкостей суден, та проведено

імітаційне моделювання процесу розходження з використанням області неприпустимих значень курсів першого судна і швидкостей другого судна. Імітаційним моделюванням процесу розходження з використанням області неприпустимих значень курсів суден нестандартної аналітичної системи попередження зіткнень суден показано коректність розроблених методів системи.

Матеріали розділу опубліковано в роботах [5, 30, 31, 33, 34, 39, 43, 53].

ВИСНОВКИ

1. Оцінка стану питання. Однією з найбільш важливих являється проблема забезпечення безаварійності судноводіння, так як від її рішення залежить зменшення кількості аварійних випадків, що сприяє охороні людського життя на морі, зниженню шкоди навколишньому середовищу і майну.

Інтенсивне судноплавство, навігаційні перешкоди та лімітуючі глибини значно ускладнюють плавання морських суден в стислих водах і створюють передумови для виникнення аварійних ситуацій. Стислі води облаштовуються станціями управління рухом суден, які не тільки контролюють процес судноводіння, а в разі потреби забезпечують зовнішнє управління процесом розходження суден при виникненні ситуації небезпечного зближення. Цим обумовлюється актуальність і перспективність розробки способів зовнішнього управління суднами, що небезпечно зближуються, чому присвячена дана робота.

2. Формулювання вирішеної наукової задачі, її значення для науки і практики. В результаті вирішення головної наукової проблеми запропоновано новий підхід, який базується на розроблених аналітичних методах розрахунку попередження зіткнення суден, реалізація яких передбачена в комп'ютерній навігаційній системі підтримки рішень, та які відрізняються використанням принципу зовнішнього управління процесом розходження суден і застосуванням методів визначення його оптимальної стратегії з використанням областей неприпустимих значень параметрів руху суден, що враховують форму безпечного домену судна.

У дисертаційній роботі:

Вперше:

- започатковано принцип зовнішнього управління процесом розходження суден, застосування якого передбачено в СУРС, чим може бути значно підвищена ефективність та безпека стратегії розходження;

- запропоновано і розроблено методи аналітичного розрахунку стратегії попередження зіткнення суден при зовнішньому управлінні, які поділяються на стандартні та нестандартні, що забезпечує можливість визначення маневру розходження в залежності від форми безпечного домену судна;

- розроблено групу методів для формування областей неприпустимих значень параметрів руху суден при зовнішньому управлінні їх процесом розходження, за допомогою графічного відображення яких визначаються стратегії розходження, що забезпечує оперативність і коректність прийняття рішення по запобіганню небезпечних зближень суден;

- розроблено метод визначення оптимального вектору зовнішнього управління групою суден, що небезпечно зближаються, яким досягається безпечне розходження зміною курсів мінімальної кількості суден групи;

- для зовнішнього управління процесом розходження суден сформовано загальний метод врахування їх динаміки і навігаційних перешкод при визначенні меж областей неприпустимих значень їх параметрів руху, який передбачає використання різних моделей обертального руху суден та їх гальмування, що забезпечує коректність використання одержаних результатів при розходженні суден в стислих районах плавання.

Одержали подальший розвиток методи урахування третього судна при визначенні параметрів маневру розходження суден елементарної групи за рахунок використання принципу зовнішнього управління процесом розходження суден за допомогою областей неприпустимих значень параметрів їх руху.

3. Висновки і рекомендації щодо наукового та практичного використання отриманих результатів. Основні теоретичні і практичні результати, отримані в дисертації, можуть бути впроваджені на судах в процесі експлуатації, а також використані компаніями, які розробляють навігаційні інформаційні системи, призначених для зовнішнього управління процесом розходження суден, та розробниками сучасних навігаційних тренажерів, а також в процесі навчання і підвищення кваліфікації судноводіїв.

4. Якісні та кількісні показники отриманих результатів. Якісним показником отриманих результатів дисертаційної роботи є можливість підвищення рівня попередження зіткнень суден розробленими методами зовнішнього управління їх процесу розходження.

Кількісним показником являється мінімізація втрат ходового часу і пального на маневр попередження зіткненням. Також кількісним показником є мінімізація часу оцінки рівня небезпеки ситуації зближення суден та вибору оптимального маневру розходження пропонованими в роботі методами зовнішнього управління їх процесом розходження.

5. Обґрунтування достовірності отриманих результатів.

Достовірність результатів дисертаційної роботи підтверджена коректною розробкою математичних моделей та їх застосуванням, та матеріалами, які одержані при імітаційному моделюванні отриманих теоретичних результатів дослідження.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Кондрашихин В.Т. Теория ошибок и ее применение к задачам судовождения / Кондрашихин В.Т. – М.: Транспорт, 1969. – 256 с.
2. Кондрашихин В.Т. Зависимость между точностью и надежностью навигации / Кондрашихин В.Т. // Судовождение и связь: Тр. ЦНИИМФ. – 1973. – Вып. 173. – С. 41-49.
3. Кондрашихин В.Т. О погрешностях измерений / Кондрашихин В.Т.// Геодезия и картография.– 1977. – № 5. – С. 11-16.
4. Кондрашихин В.Т. Определение наиболее вероятного значения повторяющейся ошибки / Кондрашихин В.Т., Якшевич Е.В. // Судовождение и связь: Тр. ЦНИИМФ. – 1972. – Вып. 157. – С. 41-49.
5. Кондрашихин В.Т. Определение места судна / Кондрашихин В.Т. - М.: Транспорт, 1989. - 230с.
6. Сорокин А.И. Гидрографические исследования Мирового океана / Сорокин А.И. – Л.: Гидрометиздат, 1980. – 287 с.
7. Hsu D.A. An analysis of error distribution in navigation / Hsu D. A. // The Journal of Navigation. – Vol. 32.- № 3. – P. 426 - 429.
8. Феллер В. Введение в теорию вероятностей и ее приложения:-Т.2. / Феллер В. - М.: Мир, 1984. - 751 с.
9. Ткаченко А.С. Применение обобщенных пуассоновских распределений для описания навигационных погрешностей / Ткаченко А.С., Алексишин В.Г. // Судовождение. – 2008. - № 15. – С. 93 – 99.
10. Широков В.М. Распределение погрешностей обсервации при использовании методов корреляционной навигации / Широков В.М.// Судовождение. - 2003. - № 6. - С. 154-158.
11. Широков В.М. Результаты имитационного моделирования обсерваций судна в стесненных условиях / Широков В.М. // Судовождение. – 2004. - № 8. – С. 103 – 107.

12. Бузовский Д.А. Имитационное моделирование влияния структуры радиолокационной системы обращенного типа на точность контроля позиции судна / Бузовский Д.А. // Судовождение: Сб. научн. трудов. / ОНМА, – Вып.12. - Одесса: «ИздатИнформ», 2006. – С. 19 – 25.

13. Мельник Е.Ф. Приближенное описание смешанных распределений погрешностей навигационных измерений / Мельник Е.Ф. // Автоматизация судовых технических средств: науч.–техн. сб. – 2002. – Вып. 7.- Одесса: ОГ-МА. – С. 96 – 100.

14. Мудров В.М. Методы обработки измерений / Мудров В.М., Кушко В.Л. - М.: Советское радио, 1976. - 192 с.

15. В.В. Степаненко. Эффективность оценки параметров ситуации опасного сближения судов/ В.В. Степаненко. // Судовождение: Сб. науч. трудов / ОГМА. – Вып. 2 – Одесса: Латстар, 2000. – С. 201 – 209.

16. Астайкин Д.В. Оценка точности координат судна при избыточных измерениях/ Астайкин Д.В., Сикирин В.Е., Ворохобин И.И., Алексейчук Б.М. – Saarbrücken, Deutschland / Германия: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2017. – 274 с.

17. Ворохобин И.И. Учет избыточных линий положения при определении координат судна / Ворохобин И.И. // Развитие науки в XXI веке: Материалы XXVII международной научно-практической конференции, 15 сентября 2017 - Харьков: научно-информационный центр «Знание», 2017. – С. 49 - 52.

18. Ворохобин И.И. Оценка навигационной безопасности при плавании судов в стесненных водах / Ворохобин И.И., Казак Ю.В., Северин В.В. – LAP LAMBERT Academic Publishing, – 2018. - 239 с.

19. Monteiro Luis. What is the accuracy of DGPS? / Sardinia Monteiro Luis, Moore Terry, Hill Chris. // J. Navig. 2005. 58, № 2, p. 207-225.

20. Pettersen Kristin Y. Underactuated dynamic positioning of a ship - experimental results / Pettersen Kristin Y., Fossen Thor I. // IEEE Trans. Contr. Syst. Technol. - 2000. - 8, № 5. - P. 856-863.

21. Астайкин Д.В. Эффективность координат судна при смеси нормально распределенных погрешностей выборки / Астайкин Д.В. // Судовождение: Сб. научн. трудов. / ОНМА, Вып. 25. – Одесса: «ИздатИнформ», 2015 - С. 10-13.
22. Астайкин Д.В. Смешанные законы распределения вероятностей случайных погрешностей навигационных измерений/ Астайкин Д.В. // Судовождение: Сб. научн. трудов./ ОНМА, Вып. 24. – Одесса: «ИздатИнформ», 2014 - С. 7-14.
23. Bober R. The DGPS system improve safety of navigation within the port of Szczecin / Bober R., Grodzicki P., Kozlowski Z., Wolski A. // 12 Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems, St. Petersburg, 23-25 May, 2005. St. Petersburg: Elektropribor. 2005, с. 192-194.
24. Комаровский Ю.А. Проблемы оценки точности определения места судна приёмниками СРНС Навстар GPS / Комаровский Ю.А. // Науч. пробл. трансп. Сиб. и Дал. Вост. 2006, № 2, с. 100-107.
25. Kubo Masayoshi. Research of method of calculation of probability of collision of ship with the rectangular bull of bridge at tearing down by wind and flow / Kubo Masayoshi, Sakakibara Shigeki, Hasegawa Yoshimi, Nagaoka Tadao. // Nihon kokai gakkai ronbunshu - J. Jap. Inst. Navig. - 2001. - 104 / - P. 225-233.
26. Ракитин В.Д. Концептуальные положения стратегии использования системы ГЛОНАСС в интересах потребителей речного флота, включая дифференциальный режим / Ракитин В.Д., Сикарев А.А. // Управление и информационные технологии на транспорте: Тезисы докладов международной научно–технической конференции «Транском – 99». Санкт-Петербург, 1999. - СПб: Изд-во СПбГУВК. – 1999. - С. 24-26.
27. Иванов Б.Е. О влиянии неопределенности положения кромок фарватера на вероятность навигационной безопасности плавания / Иванов Б.Е., Батуев А.Н. // Навигация и гидрогр. 2004, № 19, с. 35-40.
28. Ракитин В.Д. Методика подготовки библиотеки маршрутов для ис-

пользования на ВВП дифференциальных подсистем ГЛОНАСС/GPS / Раки-тин В.Д., Вуполов А.Г. // Управление и информационные технологии на транспорте: Тезисы докладов международной научно-технической конферен-ции «Транском – 99», Санкт-Петербург, 1999. - СПб: Изд-во СПбГУВК. - 1999. - С. 98-100.

29. Жидков Э.М. Анализ и обоснование требований к точности судово-ждения / Жидков Э.М., Павликов С.Н., Верещагин С.А. // Науч. тр. Дальневост. гос. техн. рыбохоз. ун-т. – 2000. - № 13. - С. 197-208.

30. Мельник Е.Ф. Обоснование выбора критерия навигационной без-опасности судовождения / Мельник Е.Ф. // Судовождение. - 2002. – № 5. – С. 65 – 73.

31. Ворохобин И.И., Северин В.В. Выражение плотности бокового от-клонения судна от программной траектории движения при нормальном за-коне распределения // Судовождение: Сб. научн. трудов / ОНМА, Вып. 26. – Одесса: «ИздатИнформ», 2016 - С. 56-59.

32. Вагущенко Л.Л. Судовые навигационно-информационные системы/ Вагущенко Л.Л. - Одесса: Феникс, 2004. - 302 с.

33. Бродский Е.Л. Комплексирование и интеграционные процессы в ин-формационных системах связи и местоопределения подвижных объектов речных региональных структур «Речные информационные службы» / Брод-ский Е.Л., Сикарев А.А. // Наукоем. технол.- 2003. - 4, № 8, с. 13-19.

34. Стебновский О.В. Формирование переходной траектории поворота судна / Стебновский О.В. // Автоматизация судовых технических средств. – 2010. – №16. – С. 92-95.

35. Чапчай Е.П. Учет времени перекладки пера руля при повороте судна/ Чапчай Е.П. // Судовождение. – 2005. - № 9. – С. 110 – 113.

36. Чапчай Е.П. Экспериментальное исследование моделей поворотливо-сти судна / Чапчай Е.П. // Судовождение. – 2006. - № 11. – С. 139 – 142.

37. K. Benedict. Simulation Augmented Manoeuvring Design and Monitoring

– a New Method for Advanced Ship Handling/ K. Benedict, M. Kirchhoff, M. Gluch, S. Fischer, M. Schaub, M. Baldauf, S. Klaes// TransNav, International magazine on marine navigation and safety of marine transport, Vol. 8, № 1, page 131-141, 2014.

38. Юдин Ю.И. Маневренные характеристики судна как функции параметров его математической модели / Юдин Ю.И., Позняков С.И.// Вестн. МГТУ (Мурманск). 2006. 9, № 2, с. 234-240.

39. Вагущенко Л.Л. Бортовые автоматизированные системы контроля мореходности / Вагущенко Л.Л., Вагущенко А.Л., Заичко С.И - Одесса: Феникс, 2005. - 274 с.

40. Кондратьев С.И. Определение параметров движения судна при изменении курса / Кондратьев С.И. - Новороссийск, 1996.- 6 с. - Рус. - Деп. в В/О «Мортехинформреклама» 26.04.96, № 1299 - МФ96.

41. Дмитриев С.П. Обоснование возможности использования линейно-квадратичного подхода при стабилизации судна на траектории / Дмитриев С.П., Пелевин А.Е. // Гироскопия и навигация. - 1997. - № 4. - С. 65-82.

42. Ohtsu K. New look at a ship handling maneuver / Ohtsu K. // Nihon kokai gakkaiishi-Navigation.- 1997.- № 134. - P. 38-46.

43. Лукомский Ю.А. Общие закономерности и специфические особенности в математических моделях морских подвижных объектов/ Лукомский Ю.А., Стариченков А.Л. // Гироскопия и навигация. - 1997. - № 2. - С. 44-52.

44. Шпекторов А.Г. Организация двухуровневой системы управления движением скоростного судна / Шпекторов А.Г., Тхань Тунг Ле.: Навигация и управление движением: Материалы 8 Конференции молодых ученых: 1 этап, Санкт-Петербург, Ц-16 марта, 2006; 2 этап, Санкт-Петербург (в Интернете), 1 июня-31 окт., 2006; 3 этап, Санкт-Петербург, 25-29 сент., 2006 СПб: ЦНИИ «Электроприбор». 2007, с. 125-130.

45. Сатаев В.В. Разработка адаптивных алгоритмов работы интеллекту-

ального авторулевого, использующих динамические особенности неустойчивых на курсе судов: автореф. дис. на соиск. уч. ст. канд. техн. наук: Волок., гос. акад. водн. трансп. / Сатаев В.В. - Нижний Новгород, 2001.- 23 с.

46. Шпекторов А.Г. Стабилизация скоростного судна на заданном маршруте / Шпекторов А.Г., Зуев В.А. // Гироскопия и навигация.- 2002. - № 3, с. 143-144.

47. Пат. 2052838 Россия, МКИ4 С 01 S 13. Способ отображения движения судов и устройство для его осуществления / Багдаллов З.Х., Багдалова Н.А. - № 5058403 09; заявл. 11.8.92; опубл. 20.1.96, Бюл. № 2.

48. Кондратьев С.И. Прогнозирование разворота разгоняющегося судна / Кондратьев С.И. - Новороссийск, 1996.- 4 с. - Рус.- Деп. в В/О «Мортехинформреклама» 26.04.96 , № 1300 – МФ96.

49. Полоз В.К. Математическая модель процесса захода судна в шлюз / Полоз В.К. // Тр. Волж. гос. акад. вод. трансп. - 1999. - № 284. - С. 26-27.

50. Тихонов В.И. Управление движения судна / Тихонов В.И. // Тр. Волж. гос. акад. вод. трансп. - 1999. - № 284. - С. 27-28.

51. Глушков С.В. Использование нечеткой логики в системе автоматического управления курсом судна / Глушков С.В.// Приборы и системы: Упр., контроль, диагност. 2007, № 8, с. 28-32.

52. Оськин Д.А. Система управления морским судном с использованием нейросетевой идентификационной модели / Оськин Д.А. // Вестн. Мор. гос. ун-та. 2008, № 27, с. 3-12.

53. Кондратьев С.И. Выбор последовательности маневров / Кондратьев С.И. - Новороссийск, 1996. - 7 с. - Рус. - Деп. в В/О «Мортехинформреклама» 26.04.96, № 1298 - МФ96.

54. Пат. 2224279 Россия, МПК7 G 05 D 1/00, В 63 Н 25/04. Устройство управления продольным движением судна / Бородин Ю.И., Довгоброд Г. М., Клячко Л. М. - № 2002129032/28; заявл. 30.10.2002; опубл. 20.02.2004.

55. Грауэр Л.В. Синтез закона управления морским подвижным объек-

том для решения задачи динамического позиционирования / Грауэр Л.В., Лопарев А.В. Навигация и управление движением: Материалы 8-й Конференции молодых ученых: 1 этап, Санкт-Петербург, 11-16 марта, 2006; 2 этап, Санкт-Петербург (в Интернете), 1 июня - 31 окт., 2006; 3 этап, Санкт-Петербург, 25-29 сент., 2006. СПб: ЦНИИ «Электроприбор». 2007, с. 137-143.

56. Ohtsu Kohei. Nihon kokai gakkai ronbunshu. / Ohtsu Kohei, Kvam Kristoffer, Fosser. Thor I., Fukuda // Navig. Jaz Inst. - 2001. - 104, P. 89-94.

57. Лентарёв А.А. Статистическое моделирование движения судов по фарватеру /Лентарёв А.А., У Льюков А.Ю. //Вестн. Мор. гос. ун-та. 2005, № 9, с. 78-83.

58. Бондарев В.А. Об устойчивости движения судна по криволинейной траектории / Бондарев В.А., Стригин А.Г., Ярков И.А. // Пробл. активиз. науч.-техн. деят-сти в эксклав. регионе России: 2 Обл. науч.- практ. конф., посвящ. 50-летию Калинингр. обл., Калининград. 4 июня, 1996, Тез. докл. - Калининград. -1996. - С. 7-12.

59. Гуцма С.Ф. Моделирование движения судна по каналу / Гуцма С.Ф. // Пробл. активиз. науч.-техн. деят-сти в эксклав. регионе России: 2 Обл. науч.- практ. конф., посвящ. 50-летию Калинингр. обл., Калининград. 4 июня, 1996: Тез. докл.— Калининград. - 1996. - С. 9-10.

60. Artyszuk J. Inherent Properties of Ship Manoeuvring Linear Models in View of the Full-mission Model Adjustment/Artyszuk J. // TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation, Vol. 10, No. 4, page 595-604, 2016.

61. Богданов В. П. Синергетика и нейросетевые системы управления курсом судна / Богданов В. П., Виткалов Я. Л., Глушков С. В., Потапов А. С. и др. - Питер. - 2006, 205 с.

62. Сахаров В.В. Алгебраический метод синтеза корректирующих устройств системы управления динамическим объектом / Сахаров В.В., Каск Я.Н., Николаев В.В. // С.-Петербург, ун-т вод. коммуникаций. Инф. поддерж-

ка систем контроля и упр. на трансп.: Сб. науч. тр. - СПб. – 1998.- с. 15-21.

63. Senda Shoichi. Study on the characteristics of ship-handling on passing fairway / Senda Shoichi, Kobayashi Hiroaki, Mizuno Hiroyuki, Arai Shiro. // Nihon kokai gakkai ronbun-shu - J. Jap. Inst. Navig. - 2000. - №102. -Р. 301-308.

64. Зайков В.И. Современное состояние математических моделей управляемого движения судна и их применение для проектирования водных путей // Внутр. вод. пути России: Ист. Современность Перспективы: Матер. и тез. докл. регион, науч.-техн. конф., по-свящ. 200-летию гос. упр. вод. коммуникациями России, Санкт-Петербург, 13 марта, 1998. – СПб. – 1998. - С. 91-101.

65. Мешалкин С.Н. Алгоритм управления рулевым приводом с возможностью коррекции принятых решений / Мешалкин С.Н., Чиркова М.М. // Тр. Волж. гос. акад. вод. трансп. – 1999. - № 283, ч. 3 . - С. 140-141.

66. Тетюев Б.А. Управление движением судна/ Тетюев Б.А. // Гироскопия и навигация. - 1996. - № 4. - С. 66.

67. Краевски Кристиан. АРГО-электронная система информации о состоянии фарватера / Краевски Кристиан. // ИНФОРМОСТ – «Радиоэлектрон, и телекоммуникации».- 2002. - № 1. - с. 62-66.

68. Fujimoto Shoji. Maneuvering ship using wheel-over position / Fujimoto Shoji, Nakozaki Tetsuya. // Nihon kokai gakkai Navigation. - 1997. - № 132. - Р. 42-50.

69. Клячко Л.М. Способы автоматического управления судном при наличии приемника СНС и носового подруливающего устройства / Клячко Л.М., Острецов Г.Э. // Судостроение (Санкт-Петербург). – 2004. - № 1. - С. 48-49.

70. Попов А.В. О повышении управляемости судна при ветре посредством ввода интеллектуальной составляющей в алгоритм авторулевого/ Попов А.В. // Вести. ВГАВТ. 2005, № 14, с. 27-35.

71. C.J. Shi. Identification of Ship Maneuvering Model Using Extended Kalman Filters/ C.J. Shi, D. Zhao, J. Peng, C. Shen// TransNav, International magazine

on marine navigation and safety of marine transport, Vol. 3, № 1, page 105-110, 2009.

72. Палагушкин В.В. Адекватное моделирование движения судов в стесненном русле реки. / Палагушкин В. В. // Современное состояние водных путей и проблемы русловых процессов: Сб. матер, раб. совещ., - Нижний Новгород, 28-30 мая, 1996. Межвуз. науч.-координацион. совет по пробл. эрозион., русловых и устьевых процессов. - М.: Изд-во МГУ. -1999. - с. 125-128.

73. K. Benedict. Manoeuvring Simulation on the Bridge for Predicting Motion of Real Ships and as Training Tool in Ship Handling Simulators/ K. Benedict, M. Kirchhoff, M. Gluch, S. Fischer, M. Baldauf // TransNav, International magazine on marine navigation and safety of marine transport, Vol. 3, № 1, page 25-30, 2009.

74. Гуцма С.Ф. Моделирование движения судов в узкостях и при швартовках / Гуцма С.Ф. // Сб. науч. тр. Балт. гос. акад. рыбопромысл. флота.- 1997.- № 16. - С. 85-91.

75. Oda H. Study on the advanced maneuver control system in dead slow speed or stopping condition. I. Function and operation of advanced joystick control system / Oda H., Igarashi K., Karasuno K., Matsushima H. // Nihon kokai gakkai ronbunshu - J. Jap. Inst. Navig. - 1994. - № 91.- P. 31-39.

76. Zhao Jun. Shanghai jiaotong daxue xuebao / Zhao Jun, Zhan Xing-qun, Zhang Yan-hua. // J. Shanghai Jiaotong Univ. -2003. - 37, № 8.- P. 1168-1171.

77. Преображенский Л.Б. Адаптивное управление неустойчивым на курсе судном / Преображенский Л.Б., Сатаев В.В. // Международная конференция по проблемам управления. Москва, 29 июня-2 июля 1999: Тез. докл. Т. 3. - М.: Фонд «Проблемы упр.» – 1999.- с. 373-374.

78. Ahmed Y.A. Consistently Trained Artificial Neural Network for Automatic Ship Berthing Control/ Ahmed Y.A., Hasegawa K. // TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation, Vol. 9, No. 3, page 417-426, 2015.

79. Nguyen Due-Hung. Designs of self-tuning control systems for ships / Nguyen Due-Hung, Park Jin-Seok, Ohtsu Kohei. // Nihon kokai gakkai ronbunshu. - J. Jap. Inst. Navig.— 1998.- № 99. – P. 235-245.

80. Zhu M. Parameter Identification of Ship Maneuvering Models Using Recursive Least Square Method Based on Support Vector Machines/Zhu M., Hahn A., Wen Y.Q., Bolles A.// TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation, Vol. 11, No. 1, page 23-29, 2017.

81. Hayashi Tadao. Nihon kokai gakkaiishi / Hayashi Tadao. Kawada Mitsugu. // Navigation.- 2000. - № 143. – P. 93-102.

82. M. Ljacki. Intelligent Prediction of Ship Maneuvering / M. Ljacki // TransNav, International magazine on marine navigation and safety of marine transport, Vol. 10, № 3, page 511-516, 2016.

83. Ince A.N. Modelling and simulation for safe and efficient navigation in narrow waterways / Ince A.N., Topuz E.J. // Navigation. - 2004. - 57, № 1. – P. 53-71.

84. Бурмака И.А. Управление судами в ситуации опасного сближения / И.А Бурмака., Э.Н Пятаков., А.Ю. Булгаков - LAP LAMBERT Academic Publishing, - Саарбрюккен (Германия), – 2016. - 585 с.

85. Фрейдзон И.Р. Моделирование корабельных систем управления / Фрейдзон И.Р. – Л.: Судостроение, 1975. - 232 с.

86. Кудряшов В.Е. Математическая модель процесса расхождения нескольких управляемых объектов / Кудряшов В.Е. // Известия ЛЭТИ. - 1976. - № 206. - С. 15-19.

87. Кудряшов В. Е. Синтез алгоритмов безопасного управления судном при расхождении с несколькими объектами / Кудряшов В.Е. // Судостроение. – 1978.- №5. – С. 35-40.

88. Lisovski I. A Differential Game Model of Ship Control Process/ Lisovski I. //Link. Sei. and Appl. Automat. Contr. – Helsinki. – 1978, - Vol.2.- P. 1557-1603.

89. Сазонов А.Е. Автоматизация судовождения / Сазонов А.Е., Родионов

А.А. - М.: Транспорт, 1977. 208 с.

90. Георгизон Е.Б. Сравнительный анализ алгоритмов расхождения судов / Георгизон Е.Б., Цаллагов Х.-Б.Н. // Теоретические вопросы построения АСУ крупнотоннажными транспортными судами. - М.: Наука, 1978. - С. 93-101.

91. Цаллагов Х.-Б.Н. Безопасное расхождение судов при централизованном автоматизированном управлении / Цаллагов Х.-Б.Н. // Задачи автоматизации управления движением судов в районах интенсивного судоходства. - М.: Ин-т Проблем Управления, 1983. - С. 29-39.

92. Куликов А.М. Оптимальное управление расхождением судов / Куликов А.М., Поддубный В.В. // Судостроение. - 1984. - № 12. - С. 22-24.

93. Бинай Кумар Синх. Области взаимных обязанностей судов / Бинай Кумар Синх // Судовождение. - 2000. - № 2. - С. 121 – 125.

94. Бинай Кумар Синх. Выбор предельно-допустимой дистанции кратчайшего сближения / Бинай Кумар Синх // Судовождение. - 2001. - № 3. - С. 38 – 42.

95. Степаненко В.В. Формализация контроля текущей ситуации и принятия решений по управлению ею / Степаненко В.В. // Судовождение. - 2001. - № 3. - С. 177– 185.

96. Степаненко В.В. К вопросу отображения ситуации расхождения судов / Степаненко В.В. // Судовождение. - № 4. - 2002. - С. 101 – 106.

97. Павлов В.В. Инвариантность и автономность нелинейных систем управления/ Павлов В.В. - Киев: Наукова думка, 1971. - 272 с.

98. Павлов В.В. Начала теории эргатических систем/ Павлов В.В. - Киев: Наукова думка, 1975. - 240 с.

99. Шептуха Ю.М. Некоторые вопросы постановки задачи синтеза систем управления движением судна в условиях конфликта / Шептуха Ю.М. // Кибернетика и вычислительная техника. - 1984. - № 61. - С. 44-48.

100. Богачук Ю.П., Положенцев И.А. Эргатическая система управления групповым движением судов/Богачук Ю.П., Положенцев И.А. // Кибернетика и вычислительная техника. - 1984. - № 61. - С. 20-23.

101. Цымбал Н.Н. Перспективные системы предупреждения столкновений судов и принципы их разработки / Цымбал Н.Н. // Материалы I международной научно-практической конференции «Науковий потенціал світу 2004». – том 60. – Днепропетровск. – Наука і освіта, 2004. - С. 44-45.

102. Цымбал Н.Н. Метод формирования множества безопасных маневров расхождения судов / Цымбал Н.Н. // Тезисы докладов на III международной научно-технической конференции «Живучесть корабля и безопасность на море». – Севастополь. – 2005. - С. 91-94.

103. Цымбал Н.Н. Перспективы использования современных технических средств для управления судами в стесненных условиях плавания / Цымбал Н.Н. // V Международная научно-техническая конференция «Гиротехнологии, навигация и управление движением». – Сборник докладов. – Киев. – 2005. – С. 301-304.

104. Цымбал Н.Н. Учет ограничений МППСС-72 при выборе маневра расхождения судов / Цымбал Н.Н., Бужбецкий Р.Ю. // Судовождение. – 2006. - № 11. – С.134 – 138.

105. Мальцев А.С. Выбор оптимального курса для расхождения судов при криволинейном движении / Мальцев А.С., Май Ба Линь // Судовождение. – №7. – 2004. – С. 47-57.

106. Мальцев А.С. Маневрирование судов при расхождении / Мальцев А.С. – Одесса: Морской тренажерный центр, 2002. – 208 с.

107. Сафин И.В. Расчет граничных значений параметров множества допустимых маневров расхождения / Сафин И.В. // Судовождение. - №4. - 2002. – С. 95 – 100.

108. Сафин И.В. Условия существования безопасных маневров расхождения / Сафин И.В. // Судовождение. - 2001. - № 3. - С. 158 – 163.

109. Сафин И.В. Анализ результатов имитационного моделирования процесса расхождения судов / Сафин И.В. // Судовождение. - №6 - 2003. – С. 122-129.

110. Сафин И.В. Выбор оптимального маневра расхождения / Сафин

И.В. // Автоматизация судовых технических средств. - №7. - 2002. - С. 115-120.

111. Сафин И.В. Оптимизация маневров для безопасного расхождения судов: автореф. дис. на соиск. учен. степени канд. техн. наук: спец. 05.22.16 «Судовождение» / Сафин И.В. – Одесса, 2004. – 23 с.

112. Бурмака И.А. Расчет длительности поворота судна при расхождении / Бурмака И.А. // Автоматизация судовых технических средств. - 2002. - №7. - С. 3- 6.

113. Бурмака И.А. Учет динамики судна при выборе маневра расхождения / Бурмака И.А. // Судовождение. – 2002. - №4. – С. 32- 36.

114. Бурмака И.А. Применение численных методов для расчета времени начала уклонения судна при расхождении / Бурмака И.А. // Судовождение. - 2003. - № 6. – С. 27-31.

115. Бурмака И.А. Учет инерционности судна при расчете момента времени завершения маневра расхождения / Бурмака И.А. // Судовождение. - № 5. - 2002. – С. 13 – 21.

116. Бурмака И.А. Безопасное расхождение судов с учетом их инерционности: автореф. дис. на соиск. учен. степени канд. техн. наук: спец. 05.22.16 «Судовождение» / Бурмака И.А.– Одесса, 2004. – 22 с.

117. Бурмака И.А. Расчет характеристик поворотливости судна по экспериментальным данным / Бурмака И.А. // Судовождение. - 2005. - № 9. - С. 7-13.

118. Бурмака И.А. Результаты имитационного моделирования процесса расхождения судов с учетом их динамики / Бурмака И.А. // Судовождение. – 2005. - №10. – С. 21 – 25.

119. Петриченко Е.А. Описание навигационных опасностей в задаче расхождения судов / Петриченко Е.А. // Судовождение. - 2002. - №5. – С. 89- 95.

120. Петриченко Е.А. Вывод условия существования множества допустимых маневров расхождения с учетом навигационных опасностей / Петриченко Е.А. // Судовождение. – 2003. – №.6. – С. 103-107.

121. Петриченко Е.А. Учет линейной навигационной опасности при расхождении судов / Петриченко Е.А. // Автоматизация судовых технических средств. – 2003. – №8. – С. 72-76.

122. Бурмака И.А. Определение параметров динамической модели поворотливости судна по натурным наблюдениям / Бурмака И.А., Бурмака А.И. // Судовождение: Сб. научн. трудов./ ОНМА, Вып. 19. – Одесса: Феникс, 2011 - С. 24-27.

123. Вагущенко Л.Л. Расхождение с судами смещением на параллельную линию пути / Л.Л. Вагущенко. – Одесса: Фенікс, 2013. – 180 с.

124. Бурмака А.И. Разработка стратегии расхождения судов в ситуации чрезмерного сближения / Бурмака А.И. // Судовождение: Сб. научн. трудов./ ОНМА, Вып. 20. – Одесса: «ИздатИнформ», 2012 – С. 32-35.

125. Бурмака А.И. Учет угловой скорости судна при расчете параметров маневра расхождения в ситуации чрезмерного сближения/ Бурмака А.И. // Судовождение: Сб. научн. трудов./ ОНМА, Вып. 21. – Одесса: «ИздатИнформ», 2012 - С. 38-41.

126. Бурмака И.А. Экстренная стратегия расхождения при чрезмерном сближении судов / Бурмака И.А., Бурмака А.И., Бужбецкий Р.Ю. – LAP LAMBERT Academic Publishing, 2014. – 202 с.

127. Hung Iran Viet. Nihon kokai gakkai ronbunshu / Hung Iran Viet, Hagiwara Hideki, Tamaru Hitoi. // J. Jap. Inst. Navig. 2007. 117, P. 35—42.

128. Якушев, А. О. Зависимость размеров судовой безопасной области от плотности распределения вероятностей позиционной погрешностей / А.О. Якушев [Текст] // Водный транспорт. – 2014. - №2 (20).– С. 84 – 88.

129. Якушев, А. О. Выбор формы безопасной области, обеспечивающей минимальное уклонение судна при расхождении [Текст] / А.О. Якушев, Э.Н. Пятаков // Автоматизация судовых технических средств. – 2015. – № 21. – С. 77 – 81.

130. Пятаков Э.Н. Взаимодействие судов при расхождении для преду-

преждения столкновения / Пятаков Э.Н., Бужбецкий Р.Ю., Бурмака И.А., Булгаков А.Ю. – Херсон: Гринь Д.С., 2015.-312 с.

131. Xu X. Modeling of Ship Collision Risk Index Based on Complex Plane and Its Realization/ Xu X., Geng X., Wen Y.Q.//TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation, Vol. 10, No. 2, 2016, page 251-256.

132. Волков А.Н. Формирование безопасной области в судовых системах навигационной информации / Волков А.Н. // Проблеми техніки: Науково-виробничий журнал. - 2013. № 4. – С 52 - 56.

133. Волков А.Н. Отображение зоны безопасности судна на электронной карте // Судовождение: Сб. научн. трудов./ ОНМА, Вып. 23. – Одесса: «Изда-тИнформ», 2013, – С 40 - 45.

134. Lisowski J. Safety of navigation based – mathematical models of game ship control / Lisowski J. // Journal of Shanghai Maritime University. - 2004. - No 104, Vol. 25. – P. 65 - 74.

135. Lisowski J. Dynamic games methods in navigator decision support system for safety navigation / Lisowski J. // Advances in Safety and Reliability. – 2005. - Vol. 2. - London-Singapore, Balkema Publishers. – P. 1285-1292.

136. Lisowski J. Game and computational intelligence decision making algorithms for avoiding collision at sea/ Lisowski J. // Proc. of the IEEE Int. Conf. on Technologies for Homeland Security and Safety. - 2005. – Gdańsk. – P. 71-78.

137. Lisowski J. Game control methods in navigator decision support system/ Lisowski J. // The Archives of Transport. - 2005. - No 3-4, Vol. XVII. – P. 133-147.

138. Lisowski J. Game Strategies of Ship in the Collision Situations/ J. Lisowski//TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation, Vol. 8, № 1, 2014, page 69-77.

139. J. Lisowski. Analysis of Methods of Determining the Safe Ship Trajectory/ J. Lisowski// TransNav, International magazine on marine navigation and safety of marine transport, Vol. 10, № 2, 2016, page 376-381.

140. Liu Yu-hong. Zhongguo hanghai/ Liu Yu-hong, Hu Shen-ping // Navig. China. 2005, № 4, p. 40-45.
141. Kimura Masafumi. Nihon kokai gakkai ronbunshu / Kimura Masafumi, Suzuki Saburo // J. Jap. Inst. Navig. 2005. 112, p. 43-48.
142. Statheros Thomas. Autonomous ship collision avoidance navigation concepts, technologies and techniques / Statheros Thomas, Howells Gareth, McDonald-Maier Klaus. // J. Navig. 2008. 61, № 1, p. 129-142.
143. L. Yongqing. Wuhan ligong daxue xuebao. Jiaotong kexue yu gongcheng ban / L. Yongqing // J. Wuhan Univ. Technol. Transp. Sci. and Eng. 2004. 28, № 5, p. 752-754.
144. Hornauer S. Trajectory Planning with Negotiation for Maritime Collision Avoidance / Hornauer S., Hahn A., Blaich M., Reuter J. // TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation, Vol. 9, No. 3, 2015, page 335-341.
145. Kao Sheng-Long. A fuzzy logic method for collision avoidance in vessel traffic service / Kao Sheng-Long, Lee Kuo-Tien, Chang Ki-Yin, Ko Min-Der// J. Navig., 2007. 60, № 1, p. 17-31.
146. Kim D. Ship Collision Avoidance by Distributed Tabu Search/ Kim D., Hirayama K., Okimoto T. // TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation, Vol. 9, No. 1, page 23-29, 2015.
147. Булгаков А.Ю. Использование опасной области курсов двух судов для выбора допустимого маневра расхождения/ Булгаков А.Ю.// Водный транспорт. – 2014. № 2 (20).– С. 12 – 17.
148. Булгаков А.Ю. Маневр расхождения трех судов с изменением их курсов / Булгаков А.Ю., Алексейчук Б.М. // Проблеми техніки: Науково-виробничий журнал. - 2014. №1 . – С. 75 - 81.
149. Бурмака И.А. Маневр расхождения трех судов изменением курсов/ Бурмака И.А, Булгаков А.Ю. // Автоматизация судовых технических средств. – 2014. – № 20. – С. 18 – 23.
150. Бурмака И.А. Предупреждение столкновений судов методами внеш-

него управления процессом расхождения / Бурмака И.А., Калиниченко Г.Е., Кулаков М.А. // Science and Education a New Dimension. Natural and Technical Sciences, V(14), Issue: 132, 2017.- С. 56 - 60.

151. Бурмака И.А. Управление группы судов в ситуации опасного сближения / Бурмака И.А, Булгаков А.Ю. // Вестник Государственного университета морского и речного флота им.адмирала С.О. Макарова. Санкт-Петербург.– 2014. – Выпуск 6 (28). – С. 9 - 13.

152. Булгаков А.Ю. Выбор маневра расхождения судов изменением курсов в системах управления движением судов/ Булгаков А.Ю., Пятаков Э.Н. // Проблеми техніки: Науково-виробничий журнал. - 2014. № 4 . – С 153 - 164.

153. Бурмака И.А. Выбор оптимального вектора управления судами изменением курсов для безопасного расхождения / Бурмака И.А, Булгаков А.Ю. // Автоматизация судовых технических средств. – 2015. – № 21. – С. 29– 33.

154. Бурмака И.А. Условие существования множества маневров расхождения судов изменением скоростей/ Бурмака И.А. // Судовождение: Сб. научн. трудов ОНМА, - 2017. - Вып. 27. – С. 32 – 37.

155. Кулаков М.А. Использование областей опасных скоростей для выбора маневра расхождения судов / Кулаков М.А., Калиниченко Г.Е., Петриченко Е.А. // Автоматизация судовых технических средств. – 2016. – № 22. – С. 62 – 65.

156. Бурмака И.А. Выбор безопасного курса судна с учетом его инерционности при использовании областей опасных курсов / Бурмака И.А.// Автоматизация судовых технических средств. – 2016. – № 22. – С. 17 – 21.

157. Кулаков М.А. Процедура определения маневра расхождения изменением скоростей судов/ Кулаков М.А. // Судовождение: Сб. научн. трудов./ ОНМА, Вып. 27. – Одесса: «ИздатИнформ», 2016 - С.

158. Копанский С.В. Графический способ оценки значения ситуационного возмущения / Копанский С.В., Волков Е.Л. // Автоматизация судовых технических средств. – 2016. – № 22. – С. 67 – 61.

159. Пятаков Э.Н. Формирование системы бинарной координации судов

с учетом закона необходимого разнообразия Эшби / Пятаков Э.Н. // Автоматизация судовых технических средств. – 2016. – № 22. – С. 75 – 78.

160. Бурмака И.А. Управление парой судов в ситуации опасного сближения/ Бурмака И.А., Калиниченко Г.Е., Кулаков М.А.// Вестник Государственного университета морского и речного флота им.адмирала С. О. Макарова. Санкт-Петербург.– 2016. – Выпуск 3 (37). – С. 64 - 71.

161. Пятаков Э.Н. Синтез системы бинарной координации при расхождении судов / Пятаков Э.Н., Копанский С.В., Волков Е.Л. // Вестник Государственного университета морского и речного флота им.адмирала С.О. Макарова. Санкт-Петербург. – 2016. – Выпуск 4 (38). – С. 23 - 28.

162. Lazarowska A. Multi-criteria ACO-based Algorithm for Ship's Trajectory Planning / Lazarowska A.// TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation, Vol. 11, No. 1, page. 31-36, 2017.

163. Lisowsky J. The Safe Control Sensitivity Functions in Matrix Game of Ships / Lisowsky J. // TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation, Vol. 12, No. 3, page. 527-532, 2018.

164. Цымбал Н.Н. Гибкие стратегии расхождения судов / Цымбал Н.Н., Бурмака И.А., Тюпиков Е.Е. – Одесса: КП ОГТ, 2007. – 424 с.

165. Бурмака И.А. Экстренная стратегия расхождения при чрезмерном сближении судов / Бурмака И.А., Бурмака А. И., Бужбецкий Р.Ю. –LAP LAMBERT Academic Publishing, 2014. – 202 с.

166. Пятаков Э.Н. Взаимодействие судов при расхождении для предупреждения столкновения / Пятаков Э.Н., Бужбецкий Р.Ю., Бурмака И.А., Булгаков А.Ю. – Херсон: Гринь Д.С., 2015. - 312 с.

167. Бурмака И.А. Управление судами в ситуации опасного сближения / И.А. Бурмака., Э.Н Пятаков., А.Ю. Булгаков - LAP LAMBERT Academic Publishing, - Саарбрюккен (Германия), – 2016. - 585 с.

168. Бурмака И.А. Теория и методы внешнего оптимального управления судов в ситуации опасного сближения: монография / Бурмака И.А.- Одесса: НУ «ОМА», 2019 - 335 с.

169. Бурмака И.А. Расчет характеристик поворотливости судна по экспериментальным данным. / Бурмака И.А. // Судовождение. – 2005. - № 9. – С. 7 – 13.
170. Бурмака И.А. Результаты имитационного моделирования процесса расхождения судов с учетом их динамики. / Бурмака И.А. // Судовождение. – 2005. - № 10. – С. 21 – 25.
171. Бурмака И.А. Поликритериальное управление процессом судовождения. / Бурмака И.А., Дудник С.А. // Судовождение. – 2006. - № 12. – С. 26 – 30.
172. Бурмака И.А. Принцип внешнего управления процессом судовождения в стесненных условиях. / Бурмака И.А. // Судовождение. – 2007. - № 13. – С. 28 – 31.
173. Стебновский О.В. Особенности управления судами в стесненных водах/ Стебновский О.В., Бурмака И.А. // Судовождение: Сб. научн. трудов. / ОНМА, Вып. 16. – Одесса: Латстар, 2008. - С.157-161.
174. Стебновский О.В. Экспериментальные данные по поворотливости судна / Стебновский О.В., Бурмака И.А. // Судовождение: Сб. научн. трудов./ ОНМА, Вып. 17. – Одесса: Латстар, 2009. - С.205 – 208.
175. Стебновский О.В. Расчет координат начала поворота судна из одного участка программной траектории на другой / Стебновский О.В., Бурмака И.А. // Судовождение: Сб. научн. трудов./ ОНМА, Вып. 18. – Одесса: Латстар, 2010. - С. 171-176.
176. Бурмака И.А. Определение параметров динамической модели поворотливости судна по натурным наблюдениям / Бурмака И.А., Бурмака А.И. // Судовождение: Сб. научн. трудов./ ОНМА, Вып. 19. – Одесса: Феникс, 2011 - С. 24-27.
177. Бурмака И.А. Учет инерционности судна при решении задач в ситуационно - технической системе предупреждения столкновений судов / Бурмака И.А. // Проблеми техніки: Науково-виробничий журнал. - 2013. № 1. – С 45 - 54.

178. Бурмака И.А. Взаимодействие судов с компенсацией ситуационного возмущения / Бурмака И.А., Калиниченко Г.Е. // Проблемы техніки: Науково-виробничий журнал. - 2014. № 1 . – С 89 - 93.

179. Бурмака И.А. Учет динамики судна при плавании в стесненных водах/ Бурмака И.А., Калиниченко Г.Е., Сааков В.А.// Проблемы техніки: Науково-виробничий журнал. - 2014. № 1 . – С 48 - 54.

180. Бурмака И.А. Оценка момента времени попадания судна в ситуацию чрезмерного сближения/ Бурмака И.А., Сафин И.В., Бурмака А.И.// Проблемы техніки: Науково-виробничий журнал. - 2014. № 1 . – С 108 - 118.

181. Бурмака И.А. Определение области курсов двух судов, обеспечивающих безопасное расхождение/ Бурмака И.А, Булгаков А.Ю. // Эксплуатация, безопасность и экономика водного транспорта. Вестник Государственного морского университета им. адмирала Ф.Ф. Ушакова. Новороссийск.– 2014. – выпуск 2 (7). – С. 17 - 20.

182. Бурмака И.А. Зависимость точности обсервации от существенных факторов / Бурмака И.А., Алексейчук Б.М. // Водный транспорт: Сб. научн. трудов, Вып. 2(20). – К.: КДАВТ, 2014 - С. 18-23.

183. Бурмака И.А. Выбор оптимального вектора управления судами изменением курсов для безопасного расхождения / Бурмака И.А, Булгаков А.Ю. // Автоматизация судовых технических средств. – 2015. – № 21 – С. 29 – 33.

184. Бурмака И.А. Оценка эффективности обсервованных координат судна при избыточных измерениях / Бурмака И.А., Астайкин Д.В., Алексейчук Б.М. // Судовождение: Сб. научн. трудов. ОНМА, Вып. 26. – Одесса: «ИздатИнформ», 2015 - С.28-34.

185. Бурмака И.А. Основные характеристики группы судов при внешнем управлении процессом судовождения / Бурмака И.А., Калиниченко Г.Е., Кулаков М.А. // Судовождение: Сб. научн. трудов./ ОНМА, Вып. 26. – Одесса: «ИздатИнформ», 2015 - С. 35-41.

186. Бурмака И.А. Оценка эффективности обсервованных координат суд-

на при избыточных измерениях / Бурмака И.А., Астайкин Д.В., Алексейчук Б.М. // Вестник Государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. Санкт-Петербург. – 2016. – Выпуск 1 (35). – С. 24 - 29.

187. Y. Kalinichenko. Analysis of mathematical models of changing the vessel's course when turning. / Y. Kalinichenko, I. Burmaka // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies.- 2016.-6/9 (84).- P. 20-31.

188. Бурмака И.А. Использование областей опасных курсов и опасных скоростей для выбора маневра расхождения/ Бурмака И.А., Пасечнюк С.С., Кулаков М.А.// Эксплуатация, безопасность и экономика водного транспорта. Вестник Государственного морского университета им. адмирала Ф. Ф. Ушакова. Новороссийск.– 2017. – Выпуск 2 (83). – С. 76 - 80.

189. Бурмака И.А. Применение областей недопустимых значений параметров для предупреждения столкновений судов при их внешнем управлении./ Бурмака И.А., Кулаков М.А., Пасечнюк С.С. // East European Scientific Journal, №11 (27), 2017, part 1.- С. 40-48.

190. Бурмака И.А. Оптимальный маневр расхождения судов изменением их скоростей /Бурмака И.А. // XXVII Международная конференция «Развитие науки в XXI веке», 15 сентября 2017г. – Харьков – С. 24-27.

191. Бурмака И.А. Формализация области опасных курсов и скоростей судов при внешнем управлении их процессом расхождения/ Бурмака И.А., Пасечнюк С.С. // Судовождение: Сб. научн. трудов ОНМА, - 2017. - Вып. 28. – С. 16-24.

192. Бурмака И.А. Способ аналитического расчета оптимального маневра расхождения пары судов изменением скоростей / Бурмака И.А. // Автоматизация судовых технических средств. – 2017. – № 23. – С. 9-14.

193. Бурмака И.А. Выбор стратегии расхождения группы судов методами внешнего управления/ Бурмака И.А.// Science and Education a New Dimension. Natural and Technical Sciences, V(16), Issue: 148, 2017.- С. 66 - 71.

194. Бурмака И.А. Применение областей недопустимых значений пара-

метров движения судов для безопасного расхождения/ Бурмака И.А., Пятаков Э.Н. // Austria - science, Issue: 11, 2018.- С. 34 - 39.

195. Бурмака И.А. Выбор совместной стратегии расхождения судов изменением параметров движения при их внешнем управлении. / И.А. Бурмака, С.С. Пасечнюк // Science and Education a New Dimension. Natural and Technical Sciences, VI (18), Issue: 158, 2018. - С. 41- 46.

196. Бурмака И.А. Методы внешнего управления судами в ситуации опасного сближения/ Бурмака И.А., Кулаков М.А., Калиниченко Г.Е.// Науковий вісник Херсонської державної морської академії. – 2017. – № 2(17). – С. 4 - 14.

197. Бурмака И.А. Учет инерционно-тормозных характеристик при выборе маневра расхождения изменением скоростей судов / Бурмака И.А. // Austria - science, Issue: 16, 2018.- С. 34 - 38.

198. Бурмака И.А. Применение области недопустимых значений параметров движения судов для безопасного расхождения при наличии мешающего судна / Бурмака И.А. // Science and Education a New Dimension. Natural and Technical Sciences, VI(22), Issue: 186, 2018.- С. 53 - 58.

199. Бурмака И.А. Маневр последовательного расхождения с двумя целями изменением курса и пассивным торможением. / Бурмака И.А. // East European Scientific Journal, № 5 (33), 2018, part 1. - С. 19 - 25.

200. Бурмака И.А. Определение предельно-допустимой дистанции сближения при эллиптической форме судового домена/ Бурмака И.А. // Austria - science, Issue: 23, 2019.- С. 36 - 43.

201. Singh B., Burmaka I. Use of an electronic chart for choosing an effective maneuver for a vessel to pass at a safe distance among several targets. // Sailor Today, Oct. 2018. - P. 41 - 42.

202. Бурмака И.А. Использование регрессионного анализа для обработки данных поворотливости судна / Бурмака И.А., Худенко Н.П. // Вісник ОНМУ: Зб. наук. праць ОНМУ, - 2014. - Вып. 1(40). – С. 83-88.

203. Стебновский О.В. Обеспечение безопасных поворотов судна при плавании в стесненных водах / Стебновский О.В., Бурмака И.А. // Сборник трудов междунар. наук.-практ. конф. «Современные информационные и инновационные технологии на транспорте». – Херсон: ХГМИ, 2009. – С. 20-22.

204. Бурмака И.А. Характеристики безопасности системы взаимодействия судов. / Бурмака И.А. // Эффективная и безопасная эксплуатация морских судов и сооружений: Материалы VI Всеукраинской научно-технической конференции, 2-4 октября 2013 г.- Севастополь: СевНТУ, 2013.- С. 133-136.

205. Бурмака И.А. Совершенствование технологии управления движением судов в районах контроля СУДС / Бурмака И.А, Булгаков А.Ю. // Сучасні технології проектування, побудови, експлуатації і ремонту суден, морських технічних засобів і інженерних споруд: Матеріали Всеукраїнської наук.-тех. конф., 21-23 травня 2014 р. – Миколаїв : МУК, 2014. – С. 40–42.

206. Бурмака И.А. Маневр расхождения нескольких судов изменением курсов / Бурмака И.А., Булгаков А.Ю. // Морські перевезення та інформаційні технології в судноплаванні: Матеріали наук.-техн. конф., 18-19 листоп. 2014 – Одеса: ОНМА, 2014. – С. 107–111.

207. Бурмака И.А. Маневр расхождения нескольких судов изменением курсов / Бурмака И.А., Калиниченко Г.Е., Сааков В.А.// Морські перевезення та інформаційні технології в судноплаванні: Матеріали наук.-техн. конф., 18-19 листоп. 2014 – Одеса: ОНМА, 2014. – С. 110-112.

208. Бурмака И.А. Влияние числа линий положения на точность обсервации / Бурмака И.А., Алексейчук Б.М. // Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті (MINTT-2014): Матеріали VI Міжнародної наук.-практ. конф., 26-28 травня. 2014 – Херсон: ХДМА, 2014. – С. 96–99.

209. Бурмака И.А. Маневр расхождения нескольких судов изменением курсов / Бурмака И.А, Булгаков А.Ю. // Сучасні технології проектування, побудови, експлуатації і ремонту суден, морських технічних засобів і інженерних споруд: Матеріали Всеукраїнської наук.-тех. конф., 20-22 травня 2015 р. –

Миколаїв: МУК, 2015. – С. 22–24.

210. Бурмака И.А. Определение оптимального вектора управления судами для безопасного расхождения/ Бурмака И.А., Булгаков А.Ю. // Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті (MINTT-2015): Матеріали VII Міжнародної наук.-практ. конф., 26-28 травня. 2015 – Херсон: ХДМА, 2015. – С. 96–99.

211. Бурмака И.А. Использование областей опасных скоростей для расхождения судов в стесненных условиях/ Бурмака И.А., Кулаков М.А.// Морські перевезення та інформаційні технології в судноплаванні: Матеріали наук.-техн. конф., 19-20 листоп. 2015 – Одеса: ОНМА, 2015. – С. 115–117.

212. Бурмака И.А. Учет инерционности судна и навигационных опасностей при расчете опасных областей курсов / Бурмака И.А., Калиниченко Г.Е. // Морські перевезення та інформаційні технології в судноплаванні: Матеріали наук.-техн. конф., 19-20 листоп. 2015 – Одеса: ОНМА, 2015. – С. 114-115.

213. Бурмака И.А. Использование областей опасных скоростей для расхождения судов в стесненных условиях / Бурмака И.А. // Морські перевезення та інформаційні технології в судноплаванні: Матеріали наук.-техн. конф., 16-17 листоп. 2016 – Одеса: ОНМА, 2016. – С. 120–122.

214. Бурмака И.А. Типы управления парой судов в ситуации опасного сближения/ Бурмака И.А. // Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті (MINTT-2016): Матеріали VIII Міжнародної наук.-практ. конф., 24-26 травня. 2016 – Херсон: ХДМА, 2016. – С. 109–112.

215. Бурмака И.А. Условие существования множества маневров расхождения судов изменением скоростей / Бурмака И.А.// Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті (MINTT-2017): Матеріали IX Міжнародної наук.-практ. конф., 23-25 травня. 2017 – Херсон: ХДМА, 2017. – С. 91–93.

216. Бурмака И.А. Определение допустимого множества маневров расхождения судов изменением скоростей / Бурмака И.А., Кулаков М.А., Кали-

ниченко Г.М. // Сучасні технології проектування, побудови, експлуатації і ремонту суден, морських технічних засобів і інженерних споруд: Матеріали Всеукраїнської наук.-тех. конф., 17-18 травня 2017 р. – Миколаїв: МУК, 2017. – С. 21–23.

217. Бурмака И.А. Внешнее управление процессом расхождения судов с помощью области их опасных курсов и скоростей. / Бурмака И.А., Пасечнюк С.С. // Транспортні технології (морський та річковий флот): інфраструктура, судноплавство, перевезення, авторматизація: Матеріали наук.-техн. конф., 16-17 листоп. 2017 – Одеса: НУ «ОМА», 2017. – С. 139 – 142.

218. Бурмака И.А. Уравнение границы области недопустимых значений параметров движения сближающихся судов / Бурмака И.А. // Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті (MINTT-2018): Матеріали X Міжнародної наук.-практ. конф., 29-31 травня. 2018 – Херсон: ХДМА, 2018. – С. 93–96.

219. Бурмака И.А. Формирование области недопустимых значений скоростей судов с учетом их инерционно-тормозных характеристик / Бурмака И.А. // Транспортні технології (морський та річковий флот): інфраструктура, судноплавство, перевезення, авторматизація: Матеріали наук.-техн. конф., 15 - 16 листоп. 2018 – Одеса : НУ «ОМА», 2018. – С. 190 – 193.

220. Родионов А.И. Формализация принятия решений о маневре при расхождении судов // Вычислительная техника на морском флоте.- М.: Рекламбюро, 1975. - С. 10-16.

221. Cockroft A. N. Enige gezichtspunten t. a. v. de bepalingen ter voorkoming van aanvazing op Zee // Nautisch en technisch tijdschrift. - 1981. - № 10.- P. 238-241.

222. Hinsch Werner. A new larboard helm rule for powerdriven vessels // The Journal of Navigation. - 1980. - № 3. - P. 403-407.

223. Scheffel B. Überlegungen zum Kollisionsschutz auf See. Linksdrehende Peilung und kooperative Ausweichmanöver zwischen Schiffen //Hansa. - 1987. - № 12. - P. 775-778.

224. Cannell W. P. Collision avoidance as a game of coordination // The Journal of Navigation. – 1981. - № 2. - P. 220-239.

225. Corlet A. G. Automation of collision avoidance at sea with special reference to the international regulations for preventing collisions at sea // Ship. Operat. Automat. - Amsterdam - Oxford. – 1975. - P. 93-100.

226. Пятаков Э.Н. Неопределенности в трактовке МППСС-72 при опасном сближении судов и выборе маневра расхождения // Судовождение: Сб. научн. трудов. / ОНМА, Вып. 23. – Одесса: «ИздатИнформ», 2013 - С. 122-129.

ДОДАТОК А

А.1. Умова існування множини безпечних маневрів розходження суден зміною швидкостей з урахуванням їх інерційності.

Перша з ознак можливого існування безлічі безпечних маневрів розходження зміною швидкостей суден полягає в з'ясуванні можливості зміни початкового відносного курсу при зміні швидкостей суден, що зближуються. Для цього розглянемо першу похідну початкового відносного курсу $K_{\text{отн}}$ по

швидкості судна V_1 . Якщо перша похідна $\frac{\partial K_{\text{отн}}}{\partial V_1}$ буде дорівнювати нулю, то

змінити початковий відносний курс $K_{\text{отн}}$ маневром швидкості неможливо. В іншому випадку слід ще переконатися, чи можна розійтися з ціллю в допустимій дистанції найкоротшого зближення.

Знайдемо вираз для $\frac{\partial K_{\text{отн}}}{\partial V_1}$, скориставшись залежністю, яка получена в

третій главі:

$$K_{\text{отн}} = \arcsin \left[\frac{V_1 \sin K_1 - V_2 \sin K_2}{\sqrt{V_1^2 + V_2^2 - 2V_1 V_2 \cos(K_1 - K_2)}} \right].$$

Позначимо $X = \frac{V_1 \sin K_1 - V_2 \sin K_2}{\sqrt{V_1^2 + V_2^2 - 2V_1 V_2 \cos(K_1 - K_2)}}$ та отримаємо

$K_{\text{отн}} = \arcsin[X]$ та шукана похідна:

$$\frac{\partial K_{\text{отн}}}{\partial V_1} = \sqrt{\frac{1}{1 - X^2}} \frac{\partial X}{\partial V_1}. \quad (\text{A.1})$$

Знайдемо вираз похідної $\frac{\partial X}{\partial V_1}$, записав X в наступному виді:

$$X = (V_1 \sin K_1 - V_2 \sin K_2) [V_1^2 + V_2^2 - 2V_1 V_2 \cos(K_1 - K_2)]^{-1/2}.$$

Тому можна записати:

$$\begin{aligned} \frac{\partial X}{\partial V_1} = & -\frac{1}{2} (V_1 \sin K_1 - V_2 \sin K_2) (V_1^2 + V_2^2 - 2V_1 V_2 \cos \Delta K)^{-3/2} (2V_1 - 2V_2 \cos \Delta K) + \\ & + \sin K_1 (V_1^2 + V_2^2 - 2V_1 V_2 \cos \Delta K)^{-1/2}, \end{aligned}$$

де $\Delta K = K_1 - K_2$.

Вираз для похідної $\frac{\partial X}{\partial V_1}$ можливо записати в наступному виді:

$$\frac{\partial X}{\partial V_1} = \frac{\sin K_1 (V_1^2 + V_2^2 - 2V_1 V_2 \cos \Delta K) - (V_1 \sin K_1 - V_2 \sin K_2) (V_1 - V_2 \cos \Delta K)}{(V_1^2 + V_2^2 - 2V_1 V_2 \cos \Delta K)^{3/2}}.$$

Розглянемо чисельник отриманого виразу, позначаючи його S:

$$\begin{aligned} S = & \sin K_1 (V_1^2 + V_2^2 - 2V_1 V_2 \cos \Delta K) - (V_1 \sin K_1 - V_2 \sin K_2) (V_1 - V_2 \cos \Delta K) = \\ = & V_1^2 \sin K_1 + V_2^2 \sin K_1 - 2V_1 V_2 \sin K_1 \cos \Delta K - (V_1^2 \sin K_1 - V_1 V_2 \sin K_2 - \\ & - V_1 V_2 \sin K_1 \cos \Delta K + V_2^2 \sin K_2 \cos \Delta K). \end{aligned}$$

Розкриваючи дужки і приводячи подібні члени, а також враховуючи, що $K_o = K_c + \Delta K$, отримаємо:

$$S = V_2 \{V_2 [\sin(K_2 + \Delta K) - \sin K_2 \cos \Delta K] + V_1 [\sin K_2 - \sin(K_2 + \Delta K) \cos \Delta K]\}.$$

З урахуванням отриманого виразу можна записати:

$$\frac{\partial X}{\partial V_1} = \frac{V_2 \{V_2 [\sin(K_2 + \Delta K) - \sin K_2 \cos \Delta K] + V_1 [\sin K_2 - \sin(K_2 + \Delta K) \cos \Delta K]\}}{(V_1^2 + V_2^2 - 2V_1 V_2 \cos \Delta K)^{3/2}}.$$

Для отримання виразу $\frac{\partial K_{\text{отн}}}{\partial V_1}$ необхідно знайти явний вид $\sqrt{\frac{1}{1-X^2}}$. Очевид-

но:

$$\sqrt{\frac{1}{1-X^2}} = \frac{\sqrt{S_n^2 + C_s^2}}{C_s},$$

де $S_n = V_1 \sin K_1 - V_2 \sin K_2$, $C_s = V_1 \cos K_1 - V_2 \cos K_2$.

В цьому випадку вираз (А.1) набирає вигляд:

$$\frac{\partial K_{\text{отн}}}{\partial V_1} = \frac{V_2 \{V_2 [\sin(K_2 + \Delta K) - \sin K_2 \cos \Delta K] + V_1 [\sin K_2 - \sin(K_2 + \Delta K) \cos \Delta K]\}}{[V_1 \cos(K_2 + \Delta K) - V_2 \cos K_2](V_1^2 + V_2^2 - 2V_1 V_2 \cos \Delta K)}. \quad (\text{A.2})$$

Подальше перетворення цього виразу дозволяє отримати:

$$\frac{\partial K_{\text{отн}}}{\partial V_1} = -\frac{V_2 \sin \Delta K}{V_1^2 + V_2^2 - 2V_1 V_2 \cos \Delta K}. \quad (\text{A.3})$$

Для характеристики зміни відносного курсу при зміні швидкостей обох суден необхідно знайти похідну від виразу (А.3) по змінній V_2 :

$$\frac{\partial^2 K_{\text{отн}}}{\partial V_1 \partial V_2} = -\frac{\partial}{\partial V_2} \left(\frac{V_2 \sin \Delta K}{V_1^2 + V_2^2 - 2V_1 V_2 \cos \Delta K} \right).$$

Диференціюючи праву частину рівності, отримаємо:

$$\frac{\partial^2 K_{\text{отн}}}{\partial V_1 \partial V_2} = -\frac{[(V_1^2 + V_2^2 - 2V_1 V_2 \cos \Delta K) - V_2(2V_2 - 2V_1 \cos \Delta K)] \sin \Delta K}{(V_1^2 + V_2^2 - 2V_1 V_2 \cos \Delta K)^2}.$$

Звертаємо увагу, що в чисельнику вираз в квадратних дужках дорівнює:

$$V_1^2 + V_2^2 - 2V_1 V_2 \cos \Delta K - V_2(2V_2 - 2V_1 \cos \Delta K) = V_1^2 - V_2^2 = \Delta V(V_1 + V_2),$$

$$\text{де } \Delta V = V_1 - V_2.$$

Отже, остаточно вираз для змішаної похідної $\frac{\partial^2 K_{\text{отн}}}{\partial V_1 \partial V_2}$ приймає вигляд:

$$\frac{\partial^2 K_{\text{отн}}}{\partial V_1 \partial V_2} = -\frac{\Delta V(V_1 + V_2) \sin \Delta K}{(V_1^2 + V_2^2 - 2V_1 V_2 \cos \Delta K)^2}. \quad (\text{A.4})$$

Аналіз отриманого виразу $\frac{\partial^2 K_{\text{отн}}}{\partial V_1 \partial V_2}$ показує, що при значеннях $\Delta K = 0$ и $\Delta K = 180$ чисельник наближається до нуля, що означає при проходженні суден на контр і паралельних курсах зміна швидкостей не впливає на величину відносного курсу. Тому в даних ситуаціях маневр розходження суден зміною швидкостей стає неможливим, а множина безпечних маневрів розходження є порожня.

З виразу (А.4) також виходить, що при рівності поточних швидкостей суден ($\Delta V = 0$) величина відносного курсу $K_{\text{отн}}$ також не змінюється. Тому в разі рівності початкових суднових швидкостей при їх однаковій зміні маневр розходження суден зміною швидкостей неможливий.

У попередньому підрозділі було показано, що область неприпустимих швидкостей пари суден має межі:

$$V_1^* = k^* V_2, \quad V_{1*} = k_* V_2,$$

$$\text{де } k^* = \frac{\sin(K_2 - \gamma^*)}{\sin(K_1 - \gamma^*)} \text{ и } k_* = \frac{\sin(K_2 - \gamma_*)}{\sin(K_1 - \gamma_*)}.$$

Очевидно, можливе існування множини безпечних маневрів розходження має місце за умови:

$$\infty > k^* > 0, \quad \infty > k_* > 0 \text{ та } k^* > k_*.$$

А.2. Активне і пасивне гальмування судна.

Знайдемо аналітичні вирази для тривалості перехідних процесів τ , пройденого за цей час відстані S і залежності швидкості судна від часу у випадках активного і пасивного гальмування.

Спочатку розглянемо активне гальмування. В роботі [11] вказується, що активне гальмування судна при постійному курсі з достатньою для практичних цілей точністю виражається диференціальним рівнянням залежності швидкості судна V від упору гвинта P , причому в даному випадку сила упору гвинта збігається за знаком з силою опору:

$$m \frac{dV}{dt} + \mu V^2 + P = 0,$$

де m - маса судна з приєднаними масами води;

μ - коефіцієнт опору.

Дане рівняння записуємо в наступному вигляді:

$$m \frac{dV}{dt} = -\mu V^2 - P. \quad (A.5)$$

По завершенню перехідного процесу судно набуває незмінну сталу швидкість V_{yp} , яка пропорційна упору гвинта P . Її величина визначається з умови динамічної рівноваги, при якому сила інерції дорівнює нулю, тобто:

$$\mu V_{yp}^2 = P.$$

Тому рівняння (A.5) приймає вигляд:

$$m \frac{dV}{dt} = -\mu(V^2 + V_{yp}^2),$$

звідки отримуємо рівняння із перемінними:

$$\frac{dV}{V^2 + V_{yp}^2} = -\frac{\mu}{m} dt. \quad (A.6)$$

Інтегруємо обидві частини рівняння, і отримаємо:

$$\frac{1}{V_{yp}} \operatorname{arctg} \frac{V}{V_{yp}} \Big|_{V_o}^{V_y} = -\frac{\mu}{m} t.$$

З даного співвідношення знаходимо залежність для інтервалу часу τ_a зниження швидкості судна з V_o до значення V_y в режимі активного гальму-

вання:

$$\tau_a = \frac{m}{\mu V_{yp}} \left[\arctg \frac{V_o}{V_{yp}} - \arctg \frac{V_y}{V_{yp}} \right], \quad (A.7)$$

Причому V_{yp} - швидкість, яка відповідає упору гвинта на задній хід. Випадок для пройденої відстані S_a при активному гальмуванні знаходимо, підставляючи в формулу (A.6) співвідношення: $dt = \frac{dS}{V}$:

$$\frac{dV}{(V^2 + V_{yp}^2)} = -\frac{\mu}{m} \frac{dS}{V}.$$

З останнього рівняння одержимо наступне співвідношення:

$$dS = -\frac{m}{\mu} \frac{V dV}{(V^2 + V_{yp}^2)},$$

яке після інтеграції обох частин дозволяє знайти залежність пройденої відстані S_a від зміни швидкості судна зі значення V_o до значення V_y в режимі активного гальмування:

$$S = -\frac{m}{2\mu} \ln \left| V^2 + V_{yp}^2 \right| \Bigg|_{V_o}^{V_y},$$

або, підставляючи межі інтегрування:

$$S_a = \frac{m}{2\mu} \ln \left| \frac{V_o^2 + V_{yp}^2}{V_y^2 + V_{yp}^2} \right|.$$

З виразу (A.7) можна отримати залежність швидкості судна при активному гальмуванні від часу. Беручи замість τ_a поточний час t , з (A.7) отримаємо:

$$\frac{m}{\mu V_{yp}} \operatorname{arctg} \frac{V_y}{V_{yp}} = \frac{m}{\mu V_{yp}} \operatorname{arctg} \frac{V_o}{V_{yp}} - t,$$

звідси

$$\operatorname{arctg} \frac{V_y}{V_{yp}} = \operatorname{arctg} \frac{V_o}{V_{yp}} - \frac{\mu V_{yp}}{m} t.$$

Очевидно,

$$\frac{V_y}{V_{yp}} = \operatorname{tg} \left(\operatorname{arctg} \frac{V_o}{V_{yp}} - \frac{\mu V_{yp}}{m} t \right),$$

або остаточно залежність швидкості судна від часу при активному гальмуванні має вигляд:

$$V_y = V_{yp} \operatorname{tg} \left(\operatorname{arctg} \frac{V_o}{V_{yp}} - \frac{\mu V_{yp}}{m} t \right).$$

При пасивному гальмуванні сила упору гвинта дорівнює нулю, а вихідне диференціальне рівняння руху судна прийме наступний вигляд:

$$m \frac{dV}{dt} + \mu V^2 = 0,$$

або

$$m \frac{dV}{dt} = -\mu V^2.$$

Розділимо змінні в цьому рівнянні:

$$\frac{m}{\mu} \frac{dV}{V^2} = -dt. \quad (\text{A.8})$$

Інтегруємо отримане рівняння, в результаті одержуємо:

$$-\frac{m}{\mu V} = -t + C. \quad (\text{A.9})$$

При $t = 0$, очевидно, $V = V_0$ і постійна інтегрування C визначається виразом:

$$C = -\frac{m}{\mu V_0},$$

тому з виразу (A.8) слідує залежність:

$$\tau_p = \frac{m}{\mu} \left(\frac{1}{V_y} - \frac{1}{V_0} \right), \quad (\text{A.10})$$

яка характеризує інтервал часу τ_p необхідний для зниження швидкості судна зі значення V_0 до значення V_y .

При пасивному гальмуванні залежність швидкості судна від часу знаходимо з виразу (A.10):

$$\frac{1}{V_y} - \frac{1}{V_0} = \frac{\mu}{m} t,$$

або

$$\frac{V_0}{V_y} = 1 + \frac{V_0 \mu}{m} t,$$

звідки

$$V_y = \frac{V_0}{1 + \frac{V_0 \mu}{m} t}.$$

Для дистанції S_p , яку при пасивному гальмуванні проходить судно, знайдемо вираз за допомогою формули (A.8). Для цього скористаємося співвідношенням $dt = \frac{dS}{V}$. З виразу (A.8):

$$\frac{m}{\mu} \frac{dV}{V^2} = -\frac{dS}{V}.$$

Поділяємо змінні:

$$\frac{m}{\mu} \frac{VdV}{V^2} = -dS.$$

Інтегруємо отримане рівняння:

$$\frac{m}{\mu} \int \frac{VdV}{V^2} = -S + C. \quad (A.11)$$

В інтегралі отриманого рівняння виробляємо заміну змінної:

$$V^2 = x, \quad dx = 2VdV.$$

Рівняння (A.11) приймає вигляд:

$$\frac{m}{\mu} \frac{1}{2} \int \frac{dx}{x} = -S + C, \text{ або}$$

$$\frac{m}{\mu} \frac{1}{2} \ln|V^2| = -S + C.$$

З урахуванням початкових умов $t=0$, $S_0 = 0$ та $V = V_0$ і з останнього рівняння знаходимо постійну інтегрування C :

$$C = \frac{m}{2\mu} \ln|V_0^2|.$$

З урахуванням одержаного виразу можна записати:

$$S = \frac{m}{2\mu} (\ln|V_o^2| - \ln|V^2|),$$

звідки отримаємо:

$$S_p = \frac{m}{2\mu} \ln \left| \frac{V_o^2}{V_y^2} \right|,$$

де V_y - швидкість судна при завершенні пасивного гальмування.

Підводячи підсумки вищевикладеного, наведемо отримані залежності для активного гальмування:

$$\tau_a = \frac{m}{\mu V_{yp}} \left[\operatorname{arctg} \frac{V_o}{V_{yp}} - \operatorname{arctg} \frac{V_y}{V_{yp}} \right],$$

$$S_a = \frac{m}{2\mu} \ln \left| \frac{V_o^2 + V_{yp}^2}{V_y^2 + V_{yp}^2} \right|,$$

$$V_a = V_{yp} \operatorname{tg} \left(\operatorname{arctg} \frac{V_o}{V_{yp}} - \frac{\mu V_{yp}}{m} t \right).$$

У разі пасивного гальмування:

$$\tau_p = \frac{m}{\mu} \left(\frac{1}{V_y} - \frac{1}{V_o} \right),$$

$$S_p = \frac{m}{2\mu} \ln \left| \frac{V_o^2}{V_y^2} \right|,$$

$$V_p = \frac{V_o}{1 + \frac{V_o \mu}{m} t}.$$

А.3. Визначення оптимального маневру розходження зміною швидкостей аналітичним способом.

Оптимальним маневром розходження є такий, при виконанні якого досягають мінімуму втрати ходового часу суден Δt_{mv} , викликаного ним. Якщо судна розходяться чисто, то $\Delta t_{mv} = 0$. Якщо ж для розходження необхідно гальмування суден, то Δt_{mv} однакові інтервалу часу від початку часу гальмування t_n до моменту часу відновлення їх початкових швидкостей після найкоротшого зближення:

$$\Delta t_{mv} = \tau_{mx} + \Delta \tau_p + \tau_{mv}, \quad (A.12)$$

де $\Delta \tau_p$ - інтервал часу між закінченням перехідного процесу щодо зниження швидкостей суден і моментом часу найкоротшого зближення t_{min} , як показано на рис. А.1;

τ_{mv} - інтервал часу, необхідний для збільшення швидкостей суден до початкових значень V_1 та V_2 .

Так як всі безпечні маневри розходження відрізняються тільки величиною часу початку маневру t_n , а інтервали часу τ_{mx} та τ_{mv} всіх маневрів однакові, то оптимальним буде маневр з мінімальним значенням $\Delta \tau_p$. З рис. А.1 слідує, що величина $\Delta \tau_p$ скорочується зі зменшенням дистанції найкоротшого зближення, а маневр є оптимальним при якому $D_{min} = D_d$ та $t_n = t_n^*$.

Для аналітичного розрахунку моменту часу початку маневру t_n^* насамперед знайдемо залежність D_{min} від t_n . Для чого використаємо вираз:

$$D_{min} = \Delta_p D_p \sin(K_{отр} - \alpha_p) = \Delta_p D_p (\sin K_{отр} \cos \alpha_p - \cos K_{отр} \sin \alpha_p).$$

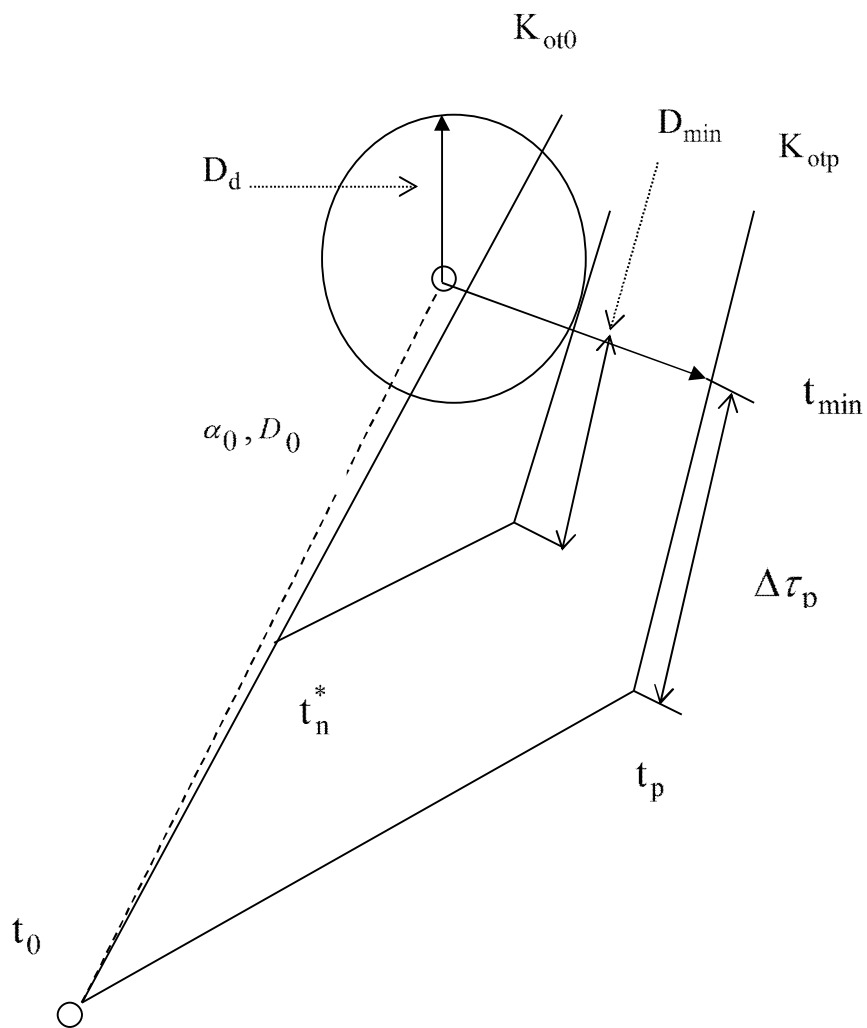


Рис. А.1. Вибір оптимального маневру розходження

Враховуємо, що:

$$\sin \alpha_p = \frac{X_{\text{mxp}} - X_{\text{mnp}}}{D_p}, \quad \cos \alpha_p = \frac{Y_{\text{mxp}} - Y_{\text{mnp}}}{D_p}.$$

Тому можна записати:

$$\sin K_{\text{отп}} \frac{Y_{\text{mxp}} - Y_{\text{mnp}}}{D_p} - \cos K_{\text{отп}} \frac{X_{\text{mxp}} - X_{\text{mnp}}}{D_p} = \frac{\Delta_p D_{\text{min}}}{D_p}, \text{ або}$$

$$\sin K_{\text{отп}}(Y_{\text{мхр}} - Y_{\text{мнр}}) - \cos K_{\text{отп}}(X_{\text{мхр}} - X_{\text{мнр}}) = \Delta_p D_{\text{min}}.$$

Підставимо в останню рівність раніше отримані вирази для координат суден $X_{\text{мхр}}$, $Y_{\text{мхр}}$, $X_{\text{мнр}}$ і $Y_{\text{мнр}}$:

$$\begin{aligned} & \sin K_{\text{отп}} \{ (V_{\text{мх}} t_n + S_{\text{мх}}) \cos K_{\text{мх}} - [V_{\text{мн}} t_n + S_{\text{мн}} + V_{\text{мны}}(t_p - \tau_{\text{мн}})] \cos K_{\text{мн}} \} - \\ & - \cos K_{\text{отп}} \{ (V_{\text{мх}} t_n + S_{\text{мх}}) \sin K_{\text{мх}} - [V_{\text{мн}} t_n + S_{\text{мн}} + V_{\text{мны}}(t_p - \tau_{\text{мн}})] \sin K_{\text{мн}} \} = \Delta_p D_{\text{min}}. \end{aligned}$$

Перетворимо отримане рівняння:

$$\begin{aligned} & \sin K_{\text{отп}} (V_{\text{мх}} \cos K_{\text{мх}} t_n - V_{\text{мн}} \cos K_{\text{мн}} t_n) - \cos K_{\text{отп}} (V_{\text{мх}} \sin K_{\text{мх}} t_n - V_{\text{мн}} \sin K_{\text{мн}} t_n) = \\ & \Delta_p D_{\text{min}} - \sin K_{\text{отп}} \{ S_{\text{мх}} \cos K_{\text{мх}} - [S_{\text{мн}} + V_{\text{мны}}(t_p - \tau_{\text{мн}})] \cos K_{\text{мн}} \} + \\ & + \cos K_{\text{отп}} \{ S_{\text{мх}} \sin K_{\text{мх}} - [S_{\text{мн}} + V_{\text{мны}}(t_p - \tau_{\text{мн}})] \sin K_{\text{мн}} \}. \end{aligned}$$

Групуємо члени рівняння:

$$\begin{aligned} & t_n [\sin K_{\text{отп}} (V_{\text{мх}} \cos K_{\text{мх}} - V_{\text{мн}} \cos K_{\text{мн}}) - \cos K_{\text{отп}} (V_{\text{мх}} \sin K_{\text{мх}} - V_{\text{мн}} \sin K_{\text{мн}})] = \\ & \Delta_p D_{\text{min}} + S_{\text{мх}} (\cos K_{\text{отп}} \sin K_{\text{мх}} - \sin K_{\text{отп}} \cos K_{\text{мх}}) + \\ & + [S_{\text{мн}} + V_{\text{мны}}(t_p - \tau_{\text{мн}})] (\cos K_{\text{отп}} \sin K_{\text{мн}} - \sin K_{\text{отп}} \cos K_{\text{мн}}), \end{aligned}$$

звідки слідує:

$$\begin{aligned} & t_n [V_{\text{мх}} (\sin K_{\text{отп}} \cos K_{\text{мх}} - \cos K_{\text{отп}} \sin K_{\text{мх}}) - V_{\text{мн}} (\sin K_{\text{отп}} \cos K_{\text{мн}} - \cos K_{\text{отп}} \sin K_{\text{мн}})] = \\ & \Delta_p D_{\text{min}} + S_{\text{мх}} \sin(K_{\text{мх}} - K_{\text{отп}}) + [S_{\text{мн}} + V_{\text{мны}}(t_p - \tau_{\text{мн}})] \sin(K_{\text{мн}} - K_{\text{отп}}), \end{aligned}$$

або

$$t_n [V_{\text{мх}} \sin(K_{\text{отп}} - K_{\text{мх}}) - V_{\text{мн}} \sin(K_{\text{отп}} - K_{\text{мн}})] =$$

$$\Delta_p D_{\min} + S_{mx} \sin(K_{mx} - K_{otp}) + [S_{mn} + V_{mny}(t_p - \tau_{mn})] \sin(K_{mn} - K_{otp}).$$

З останнього виразу отримаємо формулу залежності t_n від $D_{\min}$:

$$t_n = \frac{\Delta_p D_{\min} - S_{mx} \sin(K_{otp} - K_{mx}) - [S_{mn} + V_{mny}(t_p - \tau_{mn})] \sin(K_{otp} - K_{mn})}{V_{mx} \sin(K_{otp} - K_{mx}) - V_{mn} \sin(K_{otp} - K_{mn})}.$$

Очевидно, для оптимального маневру моменту часу t_n^* справедливий вираз:

$$t_n^* = \frac{\Delta_p D_d - S_{mx} \sin(K_{otp} - K_{mx}) - [S_{mn} + V_{mny}(t_p - \tau_{mn})] \sin(K_{otp} - K_{mn})}{V_{mx} \sin(K_{otp} - K_{mx}) - V_{mn} \sin(K_{otp} - K_{mn})}.$$

А.4. Визначення значення $D_{\min}$ при покроковій зміні величини часу t_n початку гальмування суден.

Друга ситуація небезпечного зближення зображена на рис. А.2. Вона характеризується наступними параметрами: $\alpha_0 = 283^\circ$, $D_0 = 4,3$ милі, $K_1 = 247^\circ$, $K_2 = 148^\circ$, $V_1 = 18$ вуз., $V_2 = 20$ вуз., $D_d = 1$ миля. Початкова ситуація зближення представлена в правій частині екрана.

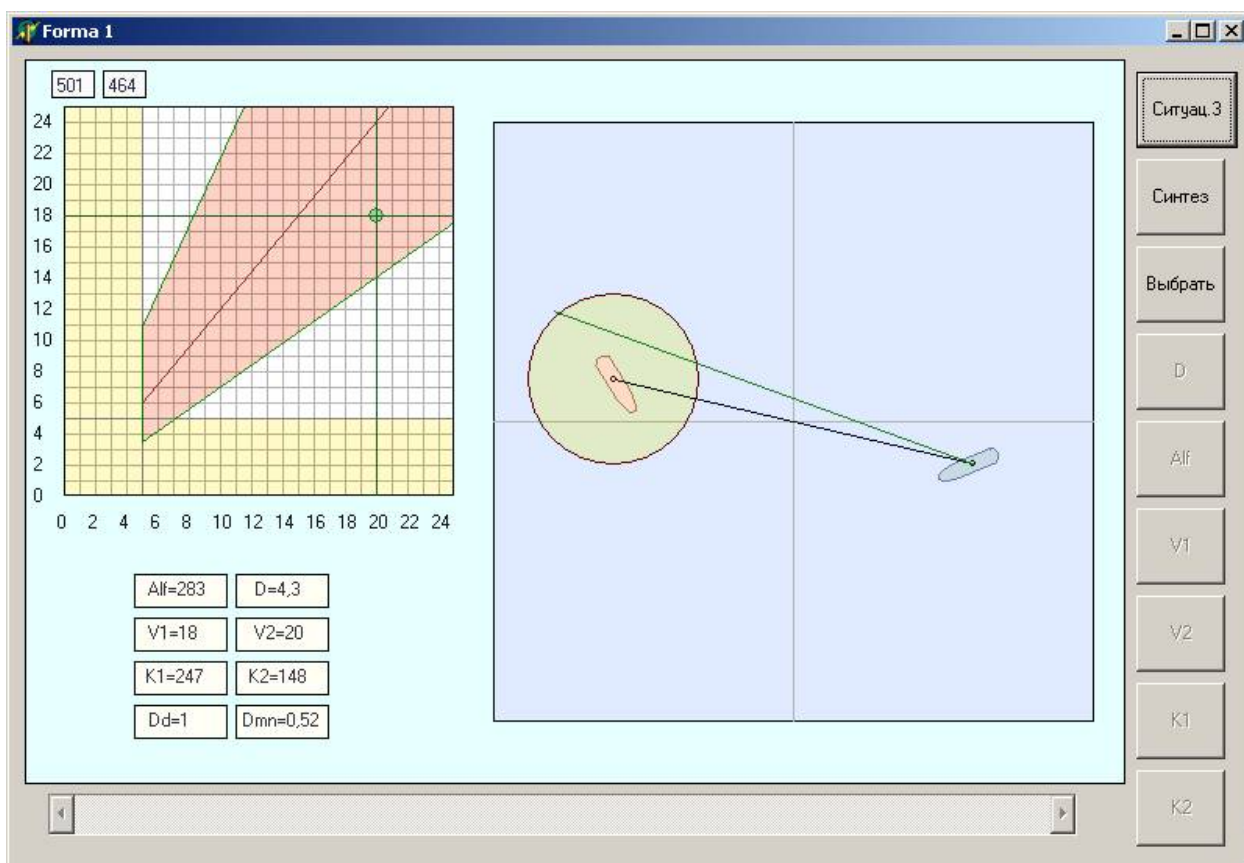


Рис. А.2. Відображення другої ситуації небезпечного зближення

Для безпечного розходження зміною швидкості обрана точка швидкостей розходження, що не належить до області небезпечних швидкостей, з координатами $V_{1y} = 6,9$ вуз. і $V_{2y} = 13,1$ вуз., як показано на рис. А.3. При даних вибраних швидкостях відносний курс дорівнює 302° . З цього ж рисунка слідує, що для маневру розходження обома суднами обрано пасивне гальмування. Тривалості перехідних процесів кожного з суден відповідно складають $\tau_{1y} = 235$ с та $\tau_{2y} = 69$ с, а пройдені за вказаний час відстані - $S_1 = 7,09$ кбт. і $S_2 = 3,10$ кбт. Також виводиться повідомлення про можливість маневру розходження, а оптимальне значення $t_n^* = 141$ с. На графіку показані криві пасивного гальмування суден.

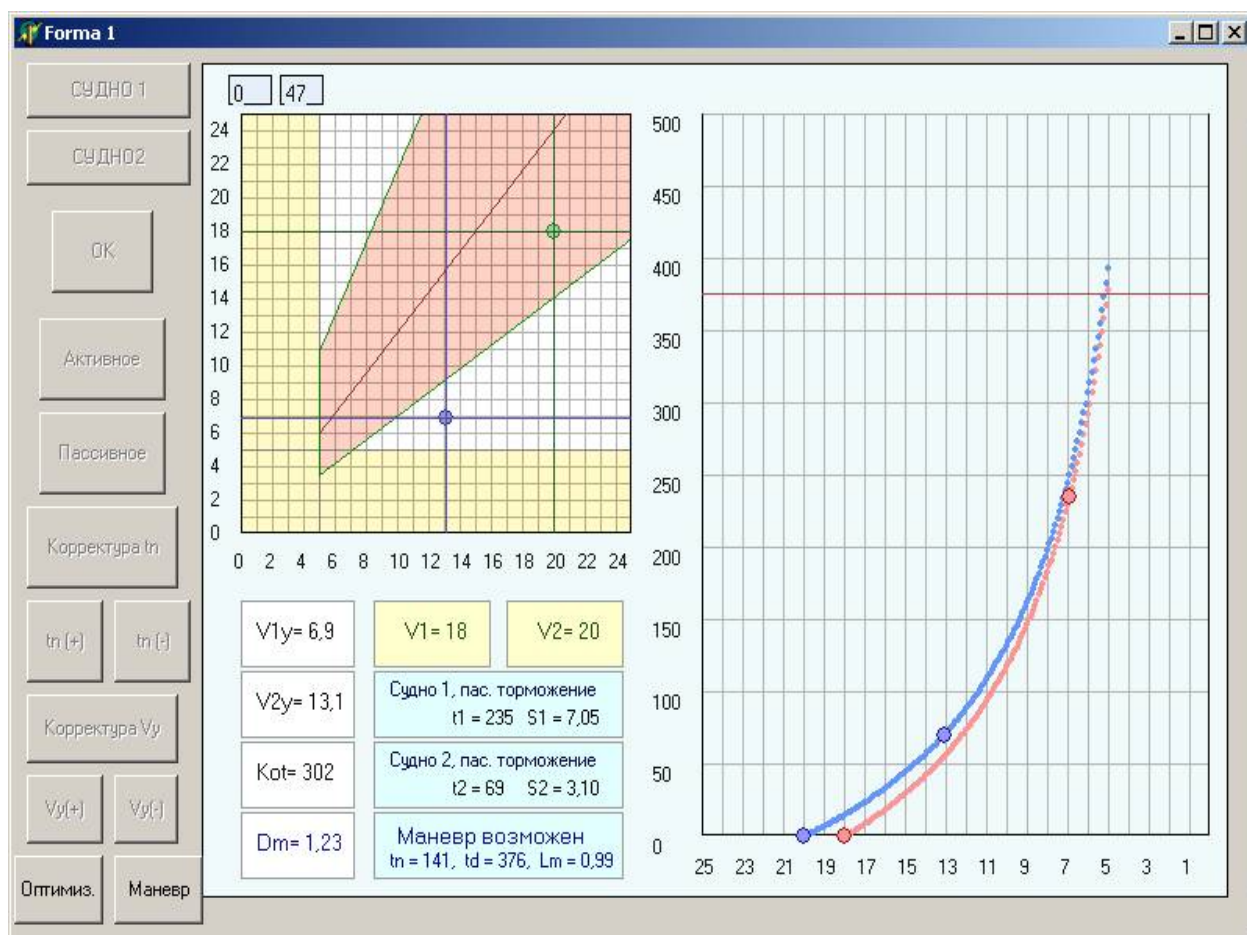


Рис. А.3. Криві пасивного гальмування суден

На рис. А.4 представлена характеристика маневру розходження пасивним гальмуванням в разі $t_n = 0$ с. Показано, що в даному випадку судна розійдуться на дистанції найкоротшого зближення $D_{min} = 1,23$ в момент часу найкоротшого зближення $t_d = 376$ с.

На рис. А.5 показано стан процесу пасивного гальмування для моменту початку гальмування $t_n = 100$ с. Для даного випадку дистанція найкоротшого зближення рівняється $D_{min} = 1,06$ милі, а криві пасивного гальмування зміщуються вгору по осі часу, а лінія завершення перехідного процесу наближається до лінії часу найкоротшого зближення $t_d = 376$ с.

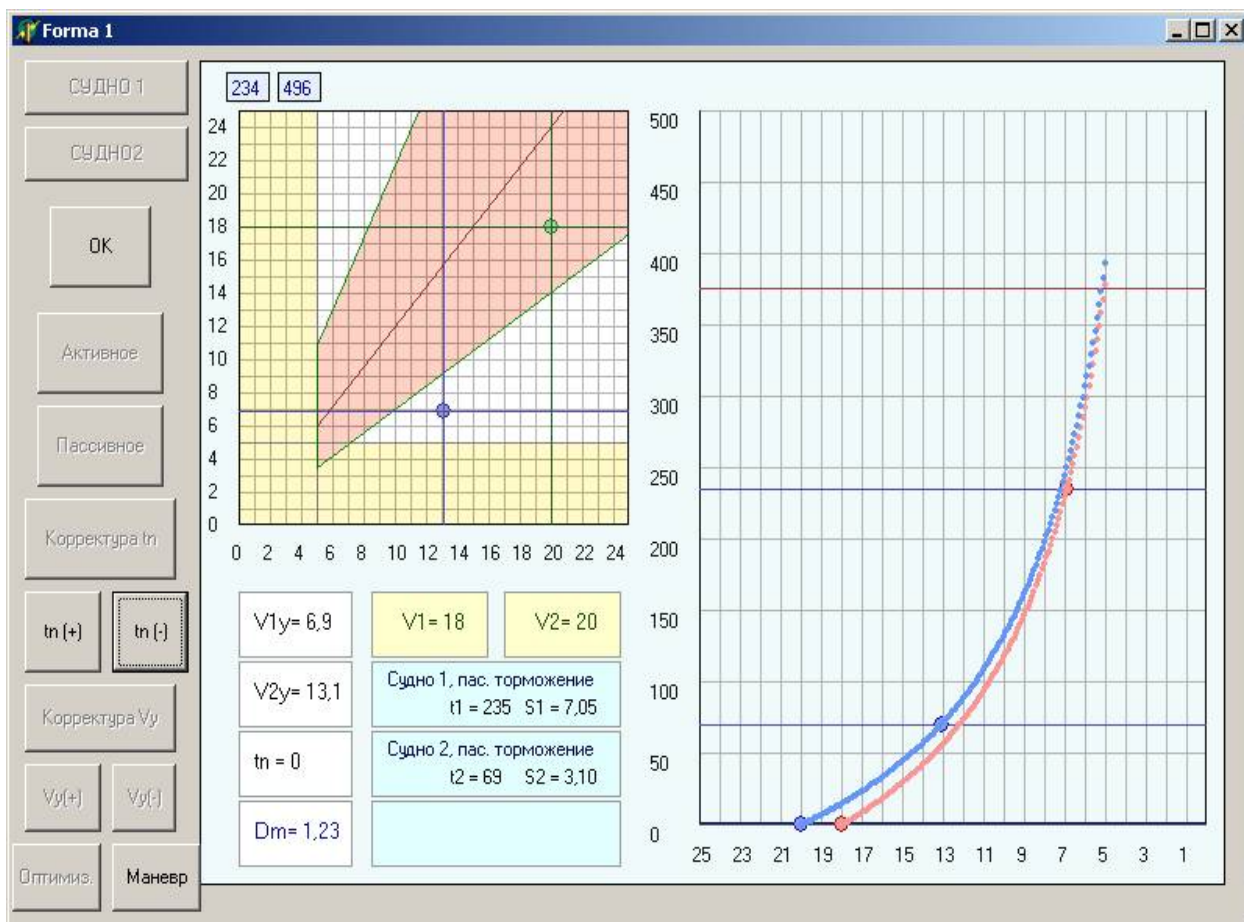


Рис. А.4. Характеристика маневру пассивного гальмування при $t_n = 0$ с

Стан маневру розходження пасивним гальмуванням при $t_n = 141$ с показано на рис. А.6. Цей момент часу визначає оптимальний маневр розходження, при якому дистанція найкоротшого зближення дорівнює $D_{\min} = 0,99$ милі.

На рис. А.7 представлена третя ситуація небезпечного зближення, яка характеризується параметрами: $D_0 = 4,3$ милі, $\alpha_0 = 176^\circ$, $K_1 = 138^\circ$, $K_2 = 31^\circ$, $V_1 = 16$ вуз., $V_2 = 22$ вуз., $D_d = 1$ миля. У правій частині екрана зображена початкова ситуація небезпечного зближення суден.

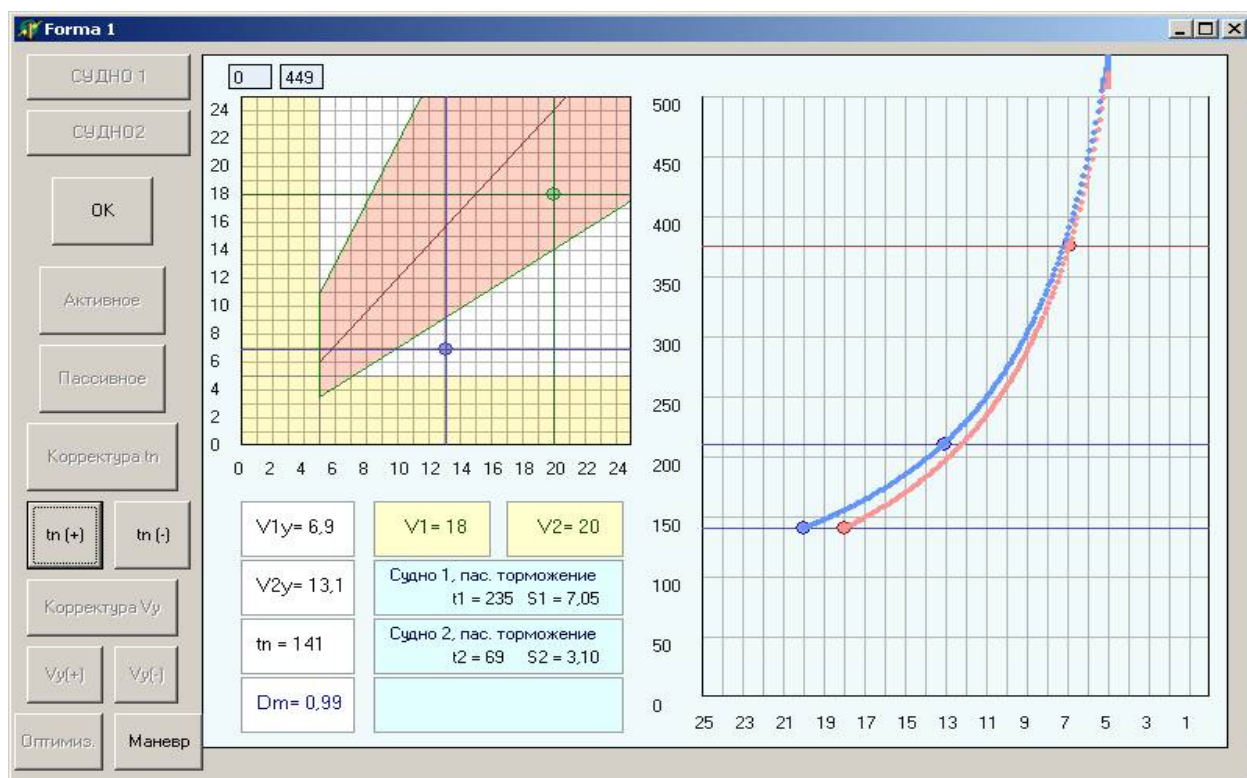


Рис. А.5. Характеристика маневру пассивного гальмування при $t_n = 100$ с

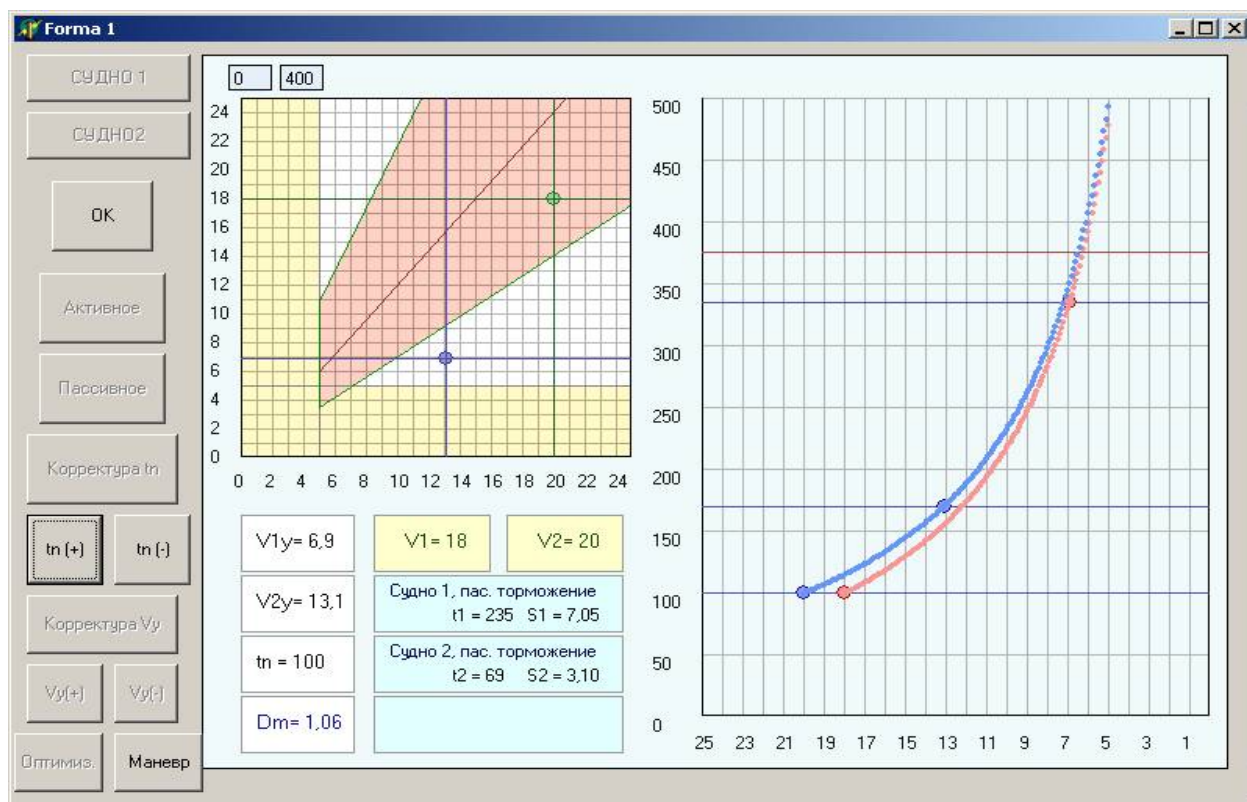


Рис. А.6. Характеристика маневру пассивного гальмування при $t_n = 141$ с

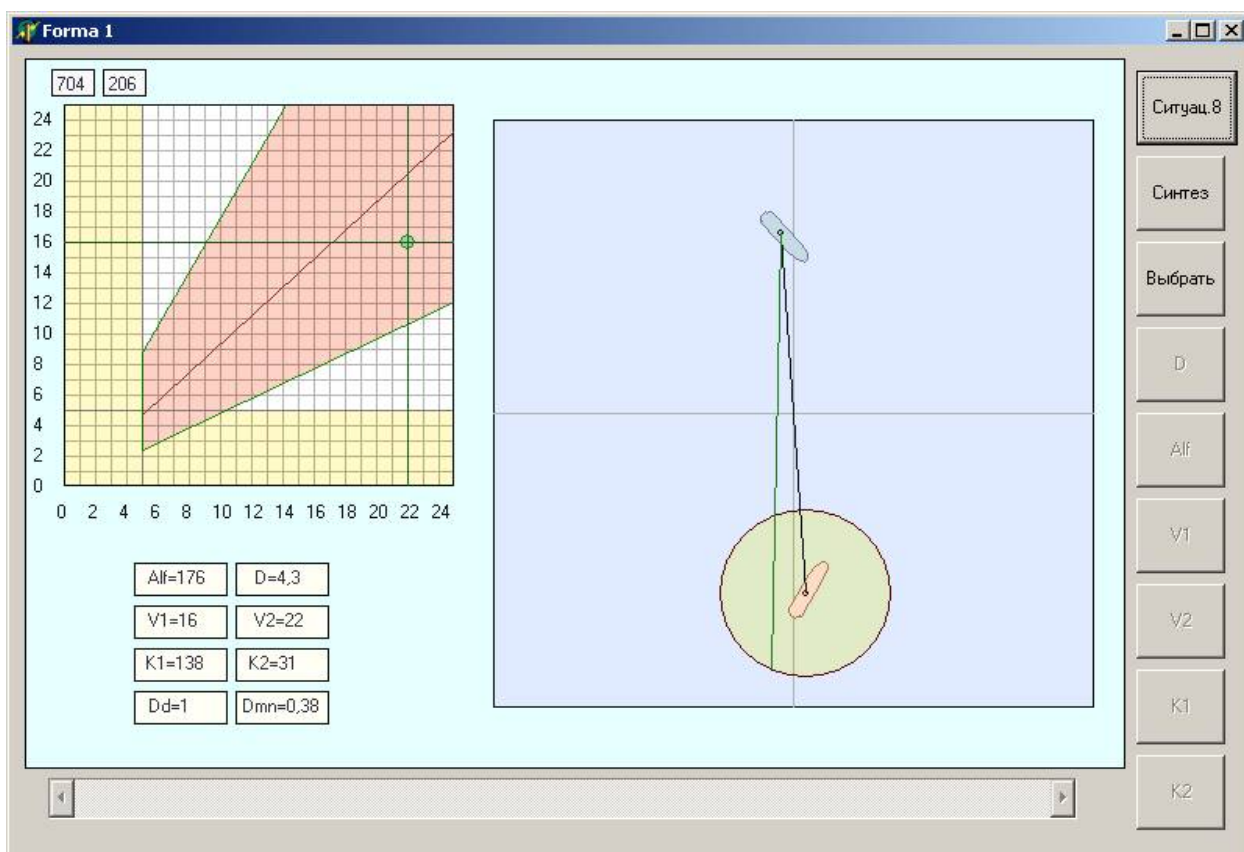


Рис. А.7. Відображення третьої ситуації небезпечного зближення

Для безпечного розходження зміною швидкості обрана точка швидкостей розходження, яка не знаходиться в області небезпечних швидкостей і координати якої $V_{1y} = 7,0$ вуз. і $V_{2y} = 20,1$ вуз., як показано на рис. А.8. При даних швидкостях відносний курс дорівнює 194° . На цьому ж рисунку показано, що для маневру розходження першим судном вибрано активне гальмування, а другим судном - пасивне гальмування.

Тривалості перехідних процесів для суден складають $\tau_{1y} = 71$ с і $\tau_{2y} = 11$ с, а пройдені за цей час відстані - $S_1 = 2,08$ кбт. и $S_2 = 0,63$ кбт. Також виводиться повідомлення про можливість маневру розходження. Оптимальне значення складе $t_n^* = 148$ с. На графіку приведені криві активного і пасивного гальмування суден.

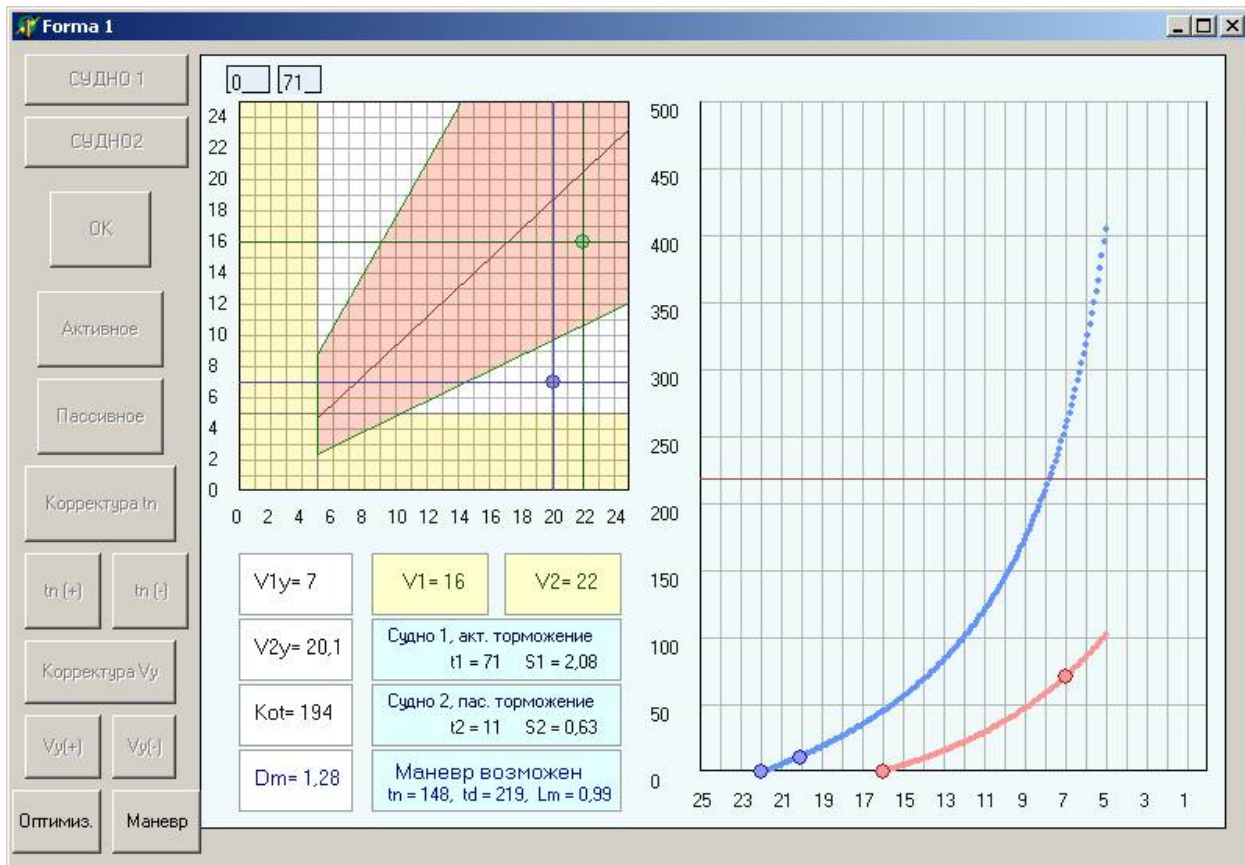
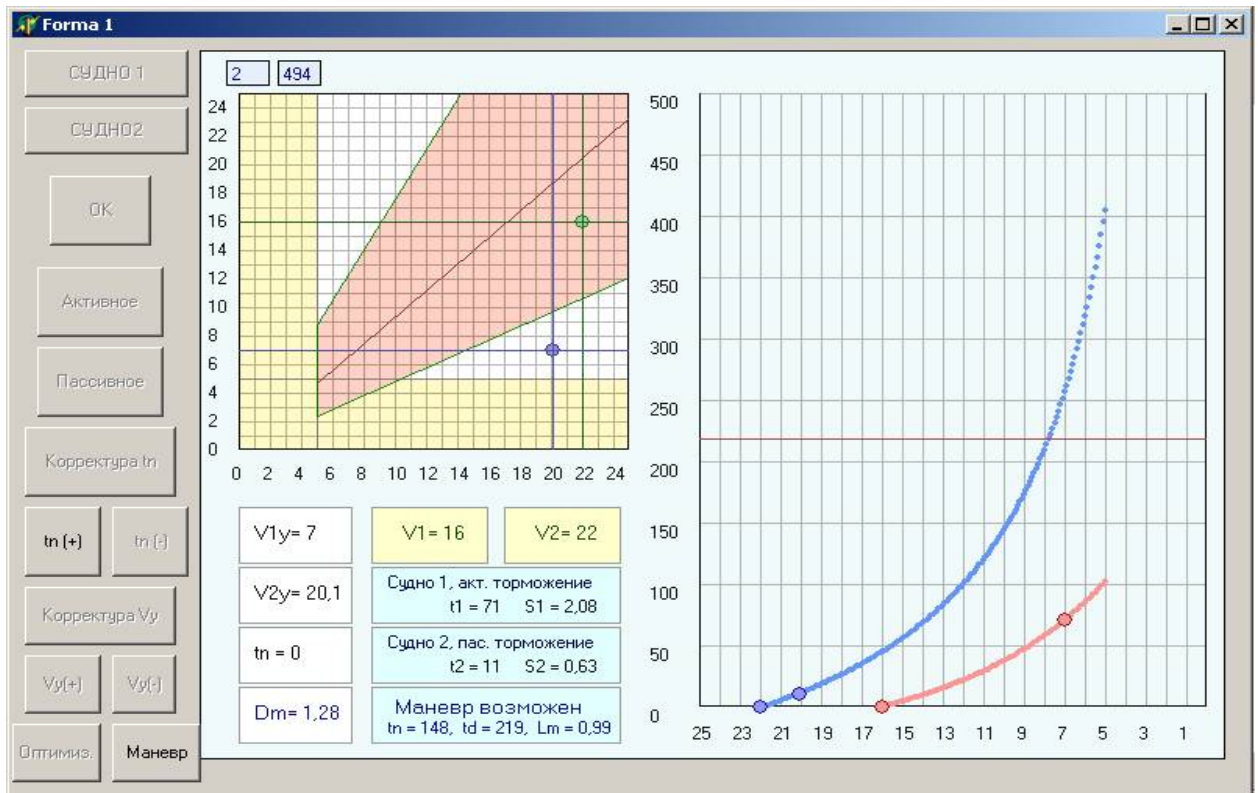
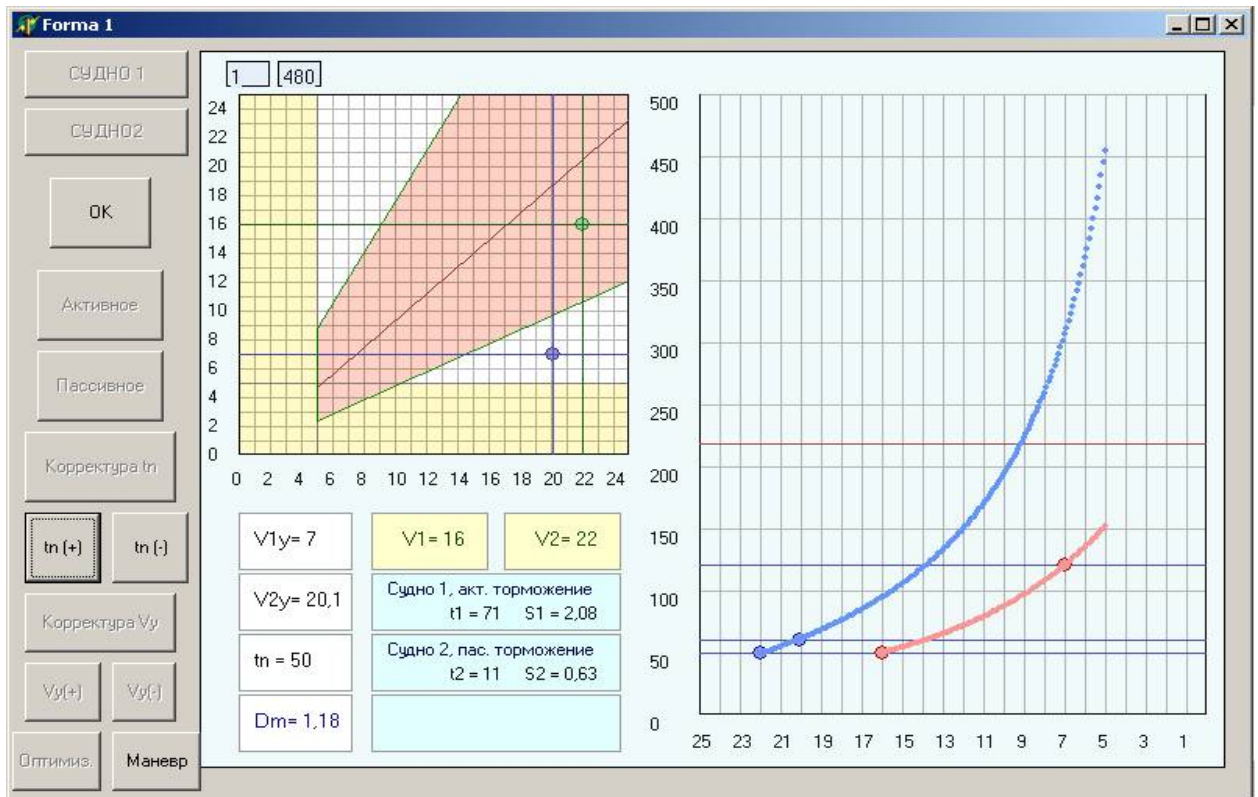


Рис. А.8. Криві активного і пасивного гальмування суден

Характеристика маневру розходження активним і пасивним гальмуванням у випадку $t_n = 0$ с представлена на рис. А.9. З рисунка слідує, що в цьому випадку судна розійдуться на дистанції найкоротшого зближення $D_{\min} = 1,28$ милі в момент часу найкоротшого зближення $t_d = 219$ с.

На рис. А. 10 зображений стан процесу розходження маневром гальмування для $t_n = 50$ с. Дистанція найкоротшого зближення дорівнює $D_{\min} = 1,18$ милі, а криві активного і пасивного гальмування зміщуються вгору по осі часу. Лінія завершення перехідного процесу відповідно наближається до лінії часу найкоротшого зближення $t_d = 219$ с.

Рис. А. 9. Стан процесу розходження гальмуванням при $t_n = 0$ сРис. А.10. Стан процесу розходження гальмуванням при $t_n = 50$ с

На рис. А.11 представлені характеристики маневру розходження для моменту часу $t_n = 100$ с. Дистанція найкоротшого зближення буде дорівнювати $D_{\min} = 1,09$ милі, а криві активного і пасивного гальмування починаються з позначки 100 с відповідно.

Стан маневру розходження активним і пасивним гальмуванням при $t_n = 148$ с показано на рис. А.12. Цей момент часу початку процесу гальмування обох суден визначає оптимальний маневр розходження, при якому дистанція найкоротшого зближення дорівнює $D_{\min} = 0,99$ милі. В даному випадку горизонтальні лінії закінчення перехідного процесу і моментів часу найкоротшого зближення збігаються.

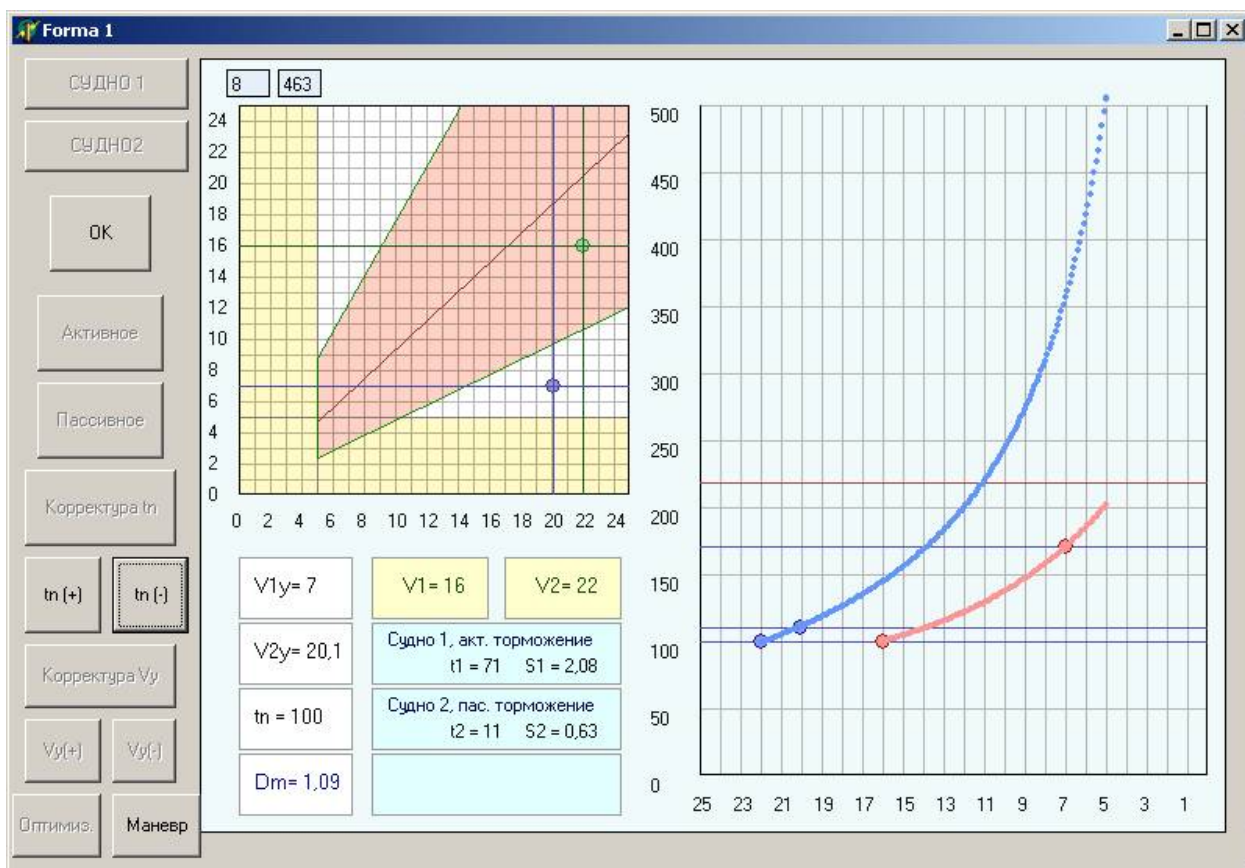


Рис. А.11. Стан процесу розходження гальмуванням при $t_n = 100$ с

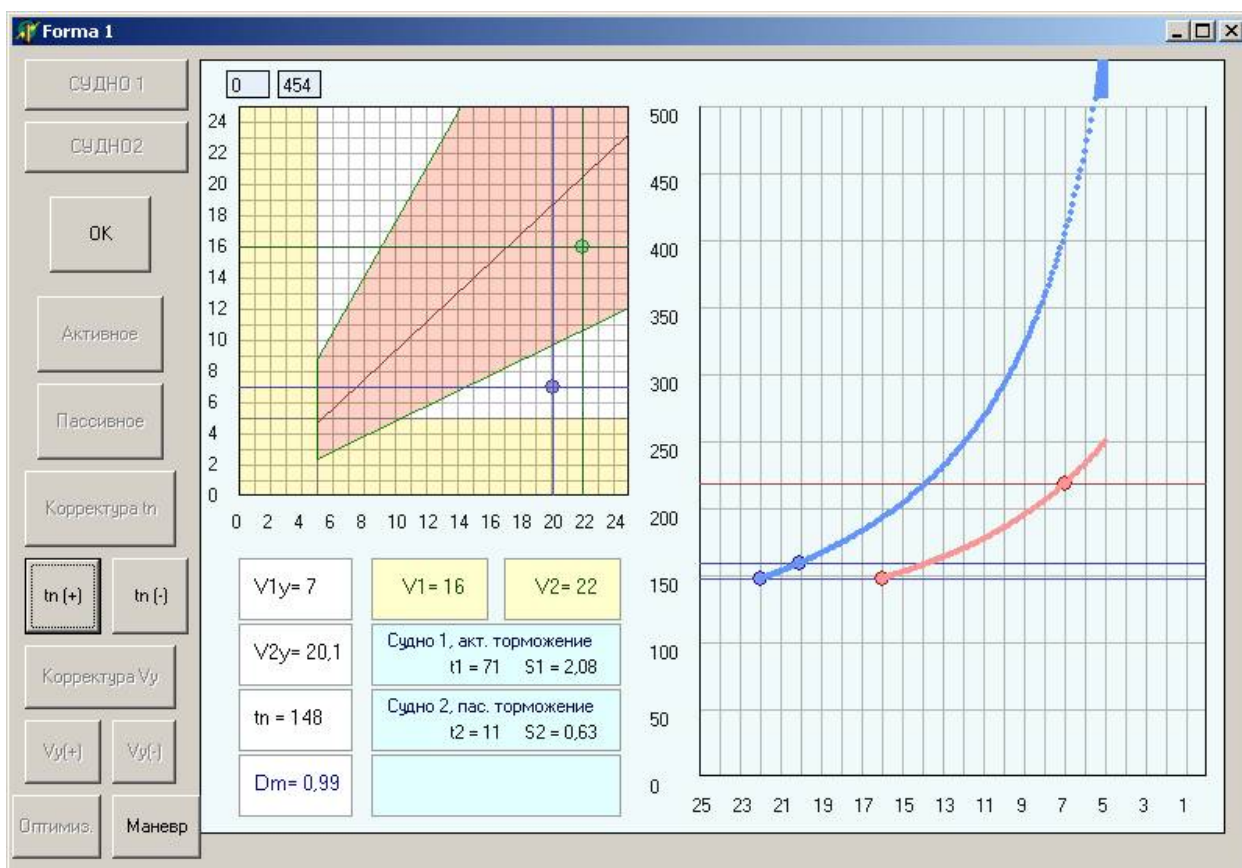


Рис. А.12. Стан процесу розходження гальмуванням при $t_n = 148$ с

Четверта ситуація небезпечного зближення зображена на рис. А.13. Її характеризують такі параметри: $\alpha_0 = 166^\circ$, $D_0 = 3,7$ милі, $K_2 = 320^\circ$, $V_1 = 19$ вуз., $V_2 = 22$ вуз., $D_d = 1$ миля. Для безпечного розходження суден при зміні швидкостей обрана точка швидкостей розходження, причому $V_{1y} = 17,0$ вуз. и $V_{2y} = 6,0$ вуз., як показано на рис. А.14. При даних швидкостях відносний курс дорівнює 185° . З цього ж рисунка слідує, що для маневру розходження першим судном вибрано пасивне гальмування, а другим судном - активне гальмування.

Стан маневру розходження активним і пасивним гальмуванням у випадку $t_n = 0$ с представлена на рис. А.15, з якого випливає, що в цьому випадку судна розійдуться на дистанції найкоротшого зближення $D_{\min} = 1,06$ милі в момент часу найкоротшого зближення $t_d = 129$ с.

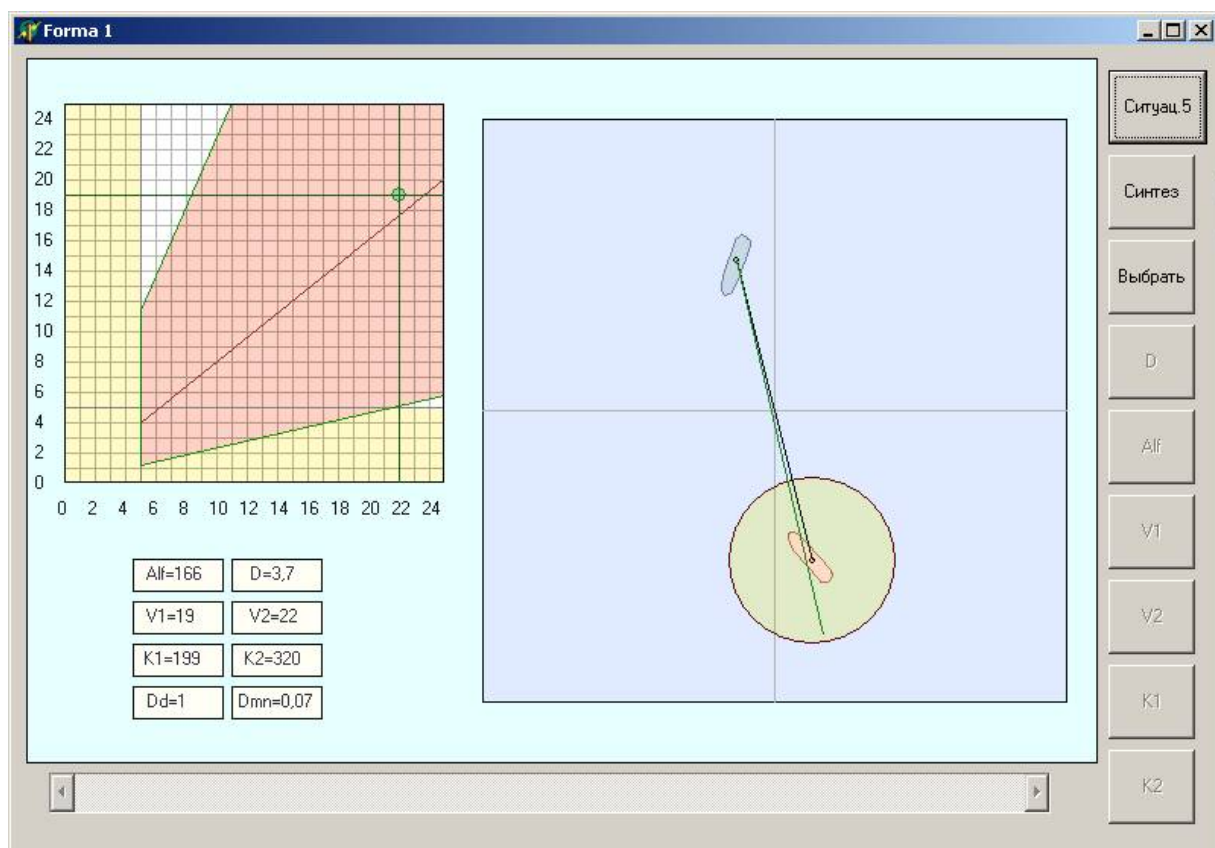


Рис. А.13. Відображення четвертої ситуації небезпечного зближення

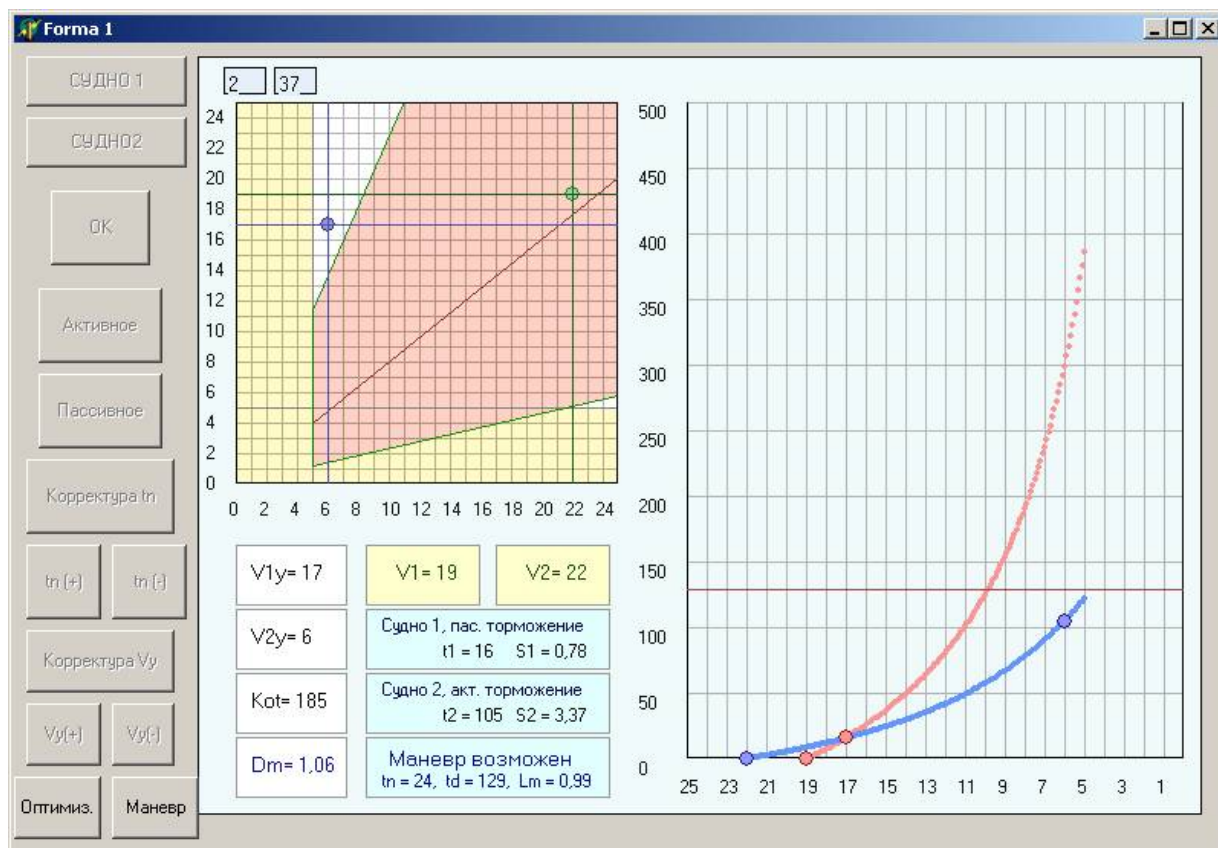


Рис. А.14. Криві активного і пасивного гальмування суден

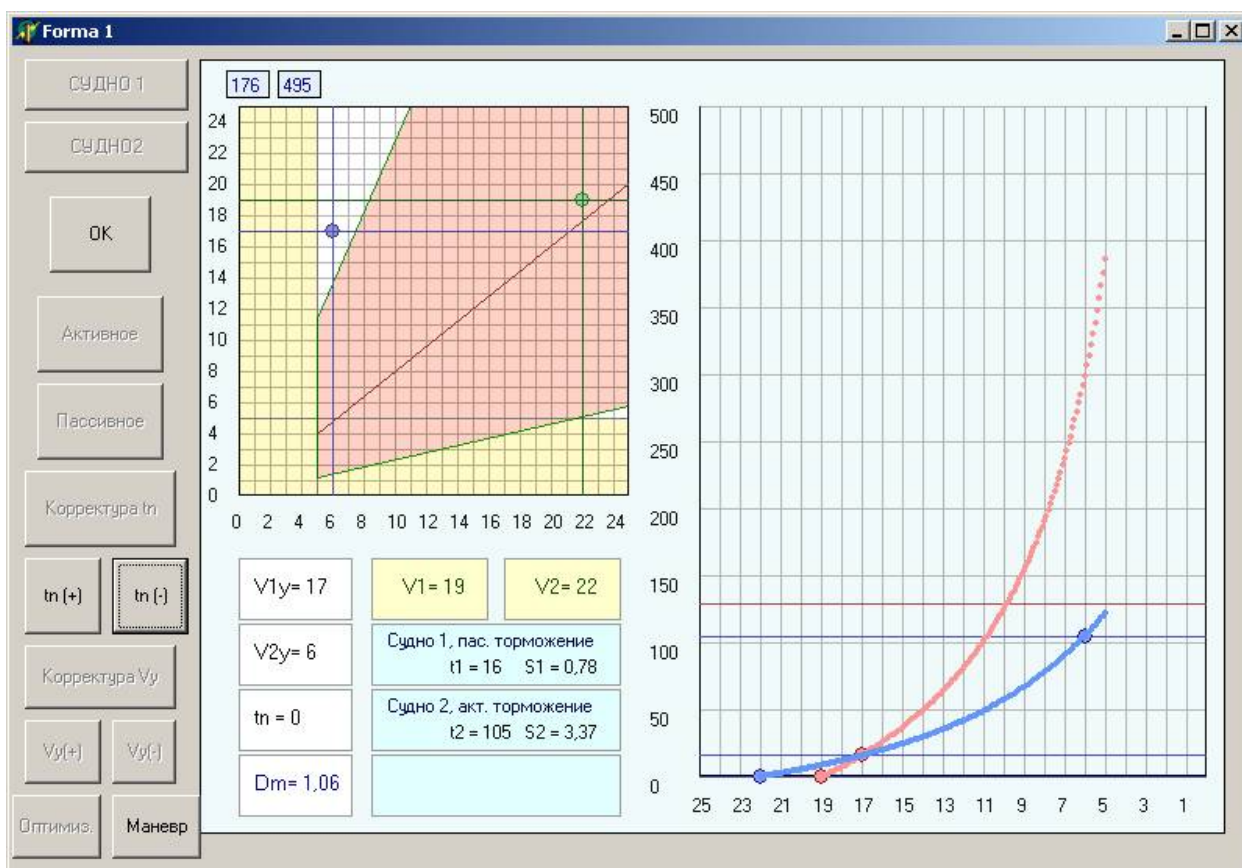


Рис. А.15. Стан процесу розходження гальмуванням при $t_n = 0$ с

На рис. А.16 показано стан маневру розходження активним і пасивним гальмуванням при $t_n = 24$ с. Даний час часу початку процесу гальмування суден пасивним і активним гальмуванням є оптимальним маневром розходження. При такому маневрі дистанція найкоротшого зближення дорівнює $D_{\min} = 0,99$ милі, а горизонтальна лінія закінчення перехідного процесу збігається з горизонтальною лінією моментів часу найкоротшого зближення $t_d = 129$ с.

Таким чином, задаючись режимами гальмування для кожного судна, які небезпечно зближуються, з використанням комп'ютерного графічного визначення оптимального маневру розходження зміною швидкостей можна дізнатися про можливість виконання обраного маневру. В разі, позитивного висновку обирається оптимальний маневр або маневр максимально близький до

оптимального Це було показано чотирма ситуаціями небезпечного зближення і обраними оптимальними маневрами розходження з різними поєднаннями режимів гальмування суден.

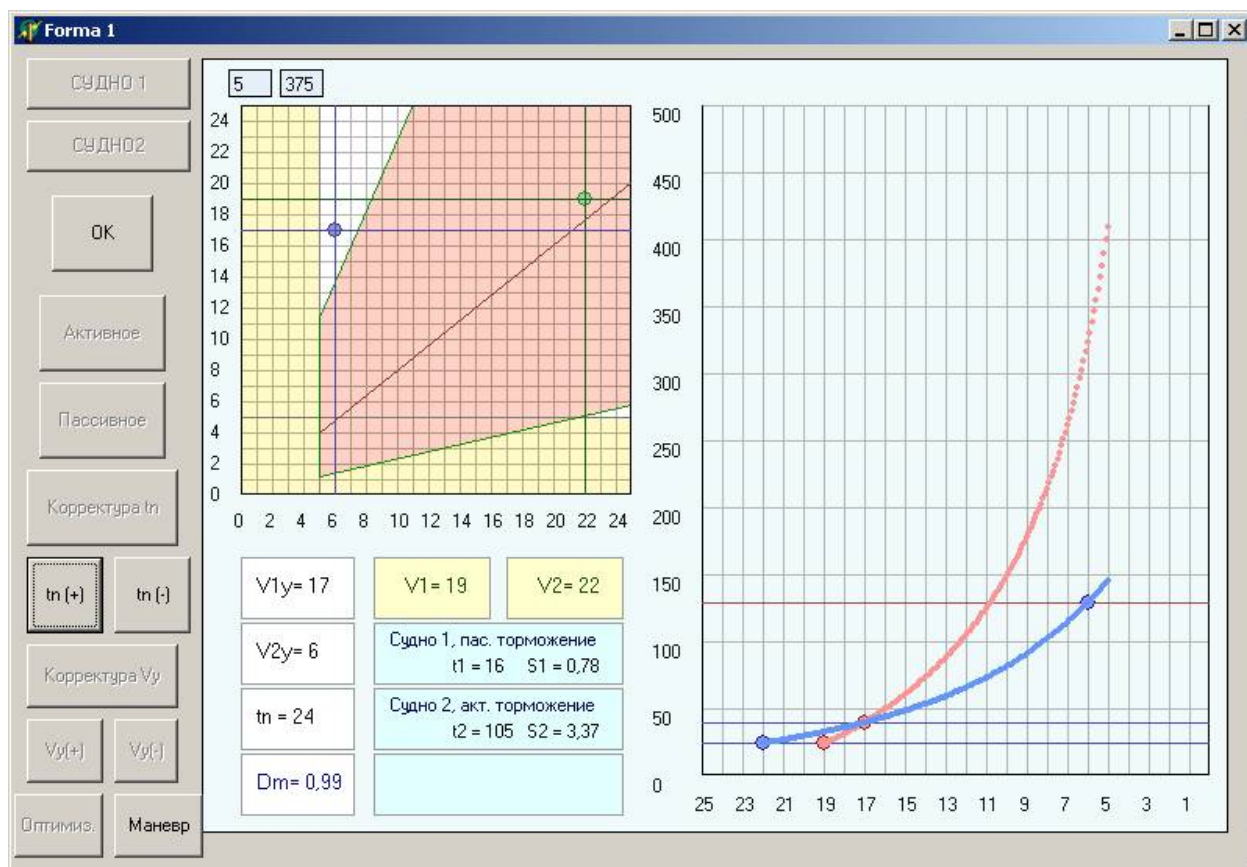


Рис. А.16. Стан процесу розходження гальмуванням при $t_n = 24$ с

ДОДАТОК Б

Б.1. Вираз для розрахунку приросту ΔD_d гранично допустимої дистанції при урахуванні інерційності повороту судна.

При повороті судна без урахування його інерційності дистанція найкоротшого зближення буде менше гранично допустимої дистанції D_d на величину ΔD_d , що дорівнює, як випливає з рис. Б.1, приросту ΔR .

З рис. Б.1 слідує, що величина $\Delta D_d = \Delta R$ визначається виразом:

$$\Delta D_d = MN \sin(K_{oty}^* - \psi). \quad (\text{Б.1})$$

Розглянемо криволінійний рух судна в першому наближенні з припущенням, що судно обертається з постійною кутовою швидкістю ω_p , а приріст координат Δx_{ot} та Δy_{ot} між точками М та N у відносному русі знаходимо з наступних міркувань.

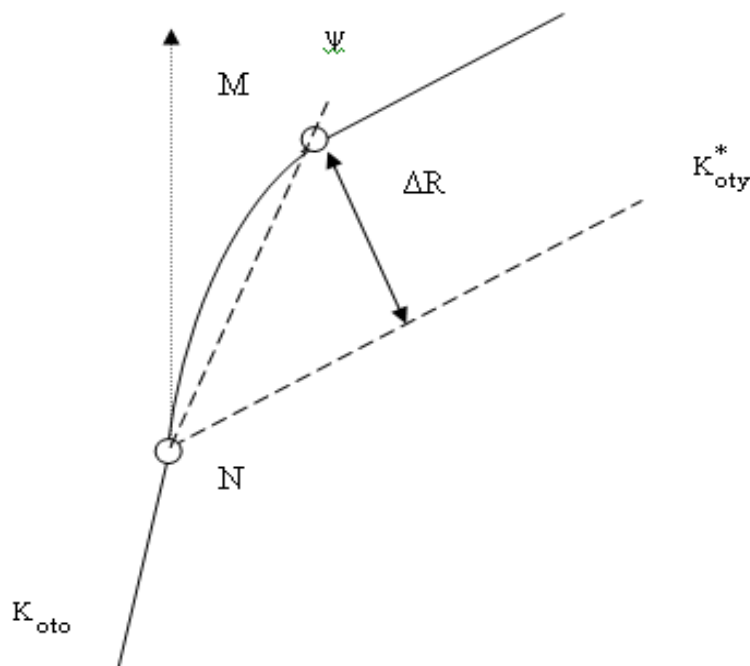


Рис. Б.1. Визначення величини ΔD_d

Очевидно, що приріст відносних координат Δx_{ot} та Δy_{ot} визначається зміною координат судів елементарної групи за час маневру τ :

$$\Delta x_{ot} = \Delta x_1 - \Delta x_2;$$

$$\Delta y_{ot} = \Delta y_1 - \Delta y_2,$$

де Δx_1 та Δy_1 – зміна координат судна, що маневрує;

Δx_2 та Δy_2 – зміна координат цілі, що зберігає сталі параметри свого руху.

Зміна курсу судна, що виконує поворот з постійною кутовою швидкістю, описується диференціальним рівнянням:

$$\dot{K} = k_{\omega} \beta_k,$$

де k_{ω} - коефіцієнт ефективності керма;

β_k - кут кладки пера керма.

Рішення рівняння має вигляд:

$$K(t) = K_{10} + a_{\omega} t,$$

де $a_{\omega} = k_{\omega} \beta_k$ – кутова швидкість повороту судна.

Приріст курсу $\Delta K = K_{1y} - K_{10}$ за час повороту τ :

$$\Delta K = a_{\omega} \tau \text{ або } \tau = \Delta K / a_{\omega}. \quad (\text{Б.2})$$

Зміна координат судна за час маневрування τ визначається наступними виразами:

$$\Delta x_1 = \int_0^{\tau} V_1 \sin[K_{10} + K(t)] dt, \quad \Delta y_1 = \int_0^{\tau} V_1 \cos[K_{10} + K(t)] dt.$$

Вирішуючи інтеграли в наведених виразах, отримаємо:

$$\begin{aligned} \Delta x_1 &= \frac{V_1}{a_{\omega}} (\cos K_{10} - \cos K_{1y}), \\ \Delta y_1 &= \frac{V_1}{a_{\omega}} (\sin K_{1y} - \sin K_{10}). \end{aligned} \quad (\text{Б.3})$$

Зміна координат цілі Δx_2 та Δy_2 за час повороту τ , враховуючи сталі параметри її руху, визначаються наступними виразами:

$$\begin{aligned} \Delta x_2 &= V_2 \tau \sin K_{20}; \\ \Delta y_2 &= V_2 \tau \cos K_{20}. \end{aligned}$$

З урахуванням отриманих виразів Δx_1 , Δy_1 , Δx_2 та Δy_2 , а також тривалості повороту τ приріст координат $\Delta x_{\text{от}}$ та $\Delta y_{\text{от}}$ приймають такий вигляд:

$$\begin{aligned} \Delta x_{\text{от}} &= \frac{V_1}{\omega_p} (\cos K_{10} - \cos K_{1y}) - V_2 \frac{K_{1y} - K_{10}}{\omega_p} \sin K_{20}, \\ \Delta y_{\text{от}} &= \frac{V_1}{\omega_p} (\sin K_{1y} - \sin K_{10}) - V_2 \frac{K_{1y} - K_{10}}{\omega_p} \cos K_{20}, \end{aligned}$$

де перша складова – криволінійний рух судна при повороті, а друга складова – прямолінійний рух цілі без зміни параметрів руху.

Очевидно, довжина відрізка MN розраховується за формулою:

$$MN = \sqrt{\Delta x_{\text{от}}^2 + \Delta y_{\text{от}}^2},$$

а кут ψ знаходиться зі співвідношення:

$$\psi = \operatorname{arctg} \frac{\Delta x_{\text{от}}}{\Delta y_{\text{от}}}.$$

Отже, остаточно вираз для ΔD_d має вигляд:

$$\Delta D_d = \sqrt{\Delta x_{\text{от}}^2 + \Delta y_{\text{от}}^2} \sin(K_{\text{от}}^* - \operatorname{arctg} \frac{\Delta x_{\text{от}}}{\Delta y_{\text{от}}}).$$

Величина ΔD_d , що розрахована для повороту судна з курсу $K_{10} = 45^\circ$ на курс $K_{1y} = 90^\circ$ з кутовою швидкістю $\omega_p = 1^\circ/\text{с}$ при тих же параметрах ситуації небезпечного зближення становить близько 0,45 милі. Тому необхідно проводити розрахунок області небезпечних курсів для граничної дистанції $D_d + \Delta D_d = 1,45$ милі, як показано на рис. Б.2.

Точка M_1 , яка була допустимою для області без урахування інерційності в разі її врахування при повороті знаходиться в області небезпечних курсів, яка приведена на рис. Б.2. Тому для безпечного судна з ціллю, яка рухається з постійними параметрами руху, судно повинно змінити свій курс на $K_{1y} = 110^\circ$ (точка M_2), що забезпечить суден на найкоротшій дистанції не менше 1 милі.

Таким чином, для врахування інерційності судна при повороті необхідно визначити в першому наближенні курс ухилення судна і розрахувати приріст ΔD_d гранично допустимої дистанції. Далі з його урахуванням сформулювати уточнену область небезпечних курсів та визначити курси безпечного розходження суден.

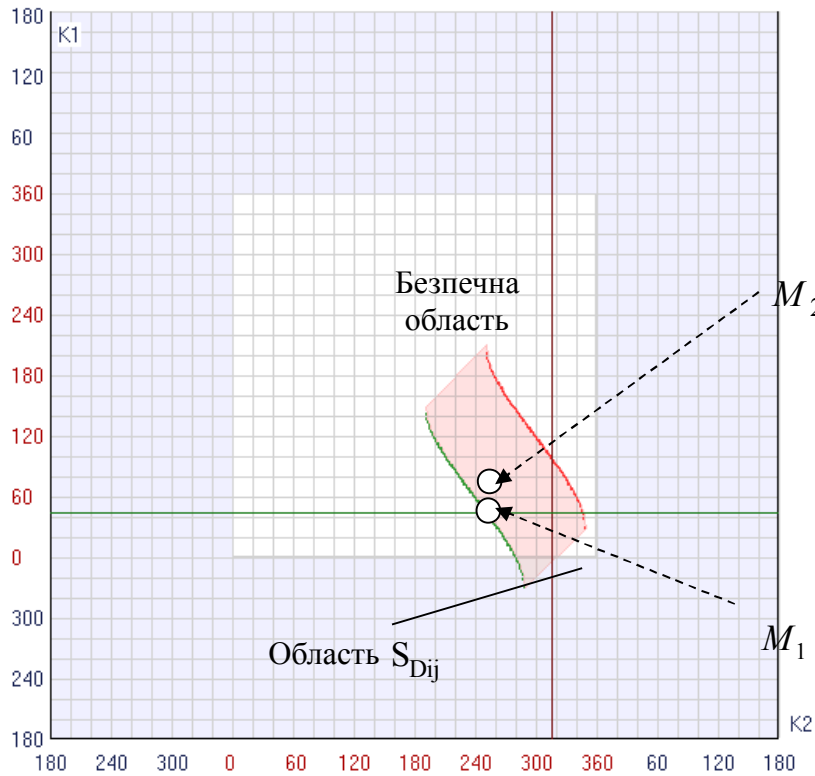


Рис. Б.2. Небезпечна область курсів з урахуванням інерційності судна

Значення ΔD_d розраховується аналогічно у разі використання інших динамічних моделей поворотності судна. Тобто спочатку слід визначити тривалість повороту судна τ , а потім приріст відносних координат Δx_{ot} та Δy_{ot} .

Очевидно, що приріст відносних координат Δx_{ot} та Δy_{ot} визначається зміною координат суден за час маневру:

$$\Delta x_{ot} = \Delta x_1 - \Delta x_2;$$

$$\Delta y_{ot} = \Delta y_1 - \Delta y_2,$$

де Δx_1 та Δy_1 – зміна координат першого судна;

Δx_2 та Δy_2 – зміна координат другого судна.

Очевидно, відстань MN і напрямок ψ пов'язані з приростами відносних координат Δx_{ot} та Δy_{ot} за допомогою наступних виразів:

$$MN = \sqrt{\Delta x_{ot}^2 + \Delta y_{ot}^2},$$

$$\psi = \operatorname{arctg} \frac{\Delta x_{ot}}{\Delta y_{ot}}.$$

Отже, вираз для розрахунку ΔD_d остаточно має вигляд:

$$\Delta D_d = \sqrt{\Delta x_{ot}^2 + \Delta y_{ot}^2} \sin(K_{oty}^* - \operatorname{arctg} \frac{\Delta x_{ot}}{\Delta y_{ot}}). \quad (Б.4)$$

Значення відносного курсу ухилення K_{oty}^* залежить від вибраних курсів ухилення суден K_{ly} та K_{2y} , причому:

$$K_{oty}^* = \alpha - \arcsin(D_d/D). \quad (Б.5)$$

Очевидно, для розрахунку ΔD_d необхідно знати приріст координат Δx_1 , Δy_1 , Δx_2 та Δy_2 обох суден за час виконання поворотів маневру, причому зазначені приріст координат залежать від форми криволінійної траєкторії руху кожного судна при виконанні повороту. Тому далі для опису повороту і оцінки величини приросту координат розглянемо різні моделі обертального руху судна.

Якщо поворот судна описується моделлю обертального руху, причому враховується інерційність при повороті і нерівномірна зміну кутової швидкості повороту, то з роботи [84] запозичуємо необхідні аналітичні вирази, що характеризують тривалість першої τ_1 та другої τ_2 фаз повороту, а також приріст координат судна Δx_i та Δy_i в результаті виконання повороту, причому:

$$\begin{aligned} \Delta x_i &= \int_0^{\tau_1} V_i \sin K^{(1)} dt + \int_0^{\tau_2} V_i \sin K^{(2)} dt, \\ \Delta y_i &= \int_0^{\tau_1} V_i \cos K^{(1)} dt + \int_0^{\tau_2} V_i \cos K^{(2)} dt, \end{aligned} \quad (Б.6)$$

де $K^{(1)}$ та $K^{(2)}$ – вирази для курсу судна на першій і другій фазах повороту.

Інерційність судна враховують дві загальноприйняті основні моделі обертального руху судна [191]. У першій моделі обертальний рух судна визначається диференціальним рівнянням другого порядку зміни курсу при повороті, а тривалість першої τ_1 та другої τ_2 фаз повороту обчислюються методом простих ітерацій з рівняння:

$$\begin{aligned}\tau_1 &= T_1 [1 - \exp(-\tau_1/T_1)] + \tau_2 - T_1 [2 - \exp(-\tau_1/T_1)][1 - \exp(-\tau_2/T_1)] + \Delta K_i / \omega_p, \\ \tau_2 &= T_1 \ln [2 - \exp(-\tau_1/T_1)],\end{aligned}\quad (Б.7)$$

де $\Delta K_i = K_{iy} - \sin K_{io}$, T_1 – постійна часу, що характеризує інерційність судна при обертальному русі. Величина $\tau_1 = \Delta K_i / \omega_p$ приймається початковим наближенням в ітераційному циклі.

Вирази для курсу судна на першій і другій фазах повороту $K^{(1)}$ та $K^{(2)}$, у свою чергу, мають наступний вигляд:

$$\begin{aligned}K^{(1)} &= K_o + \omega_p \{t - T_1 [1 - \exp(-t/T_1)]\}, \\ K^{(2)} &= K^{(1)}(\tau_1) + \omega_p \{T_1 [2 - \exp(-\tau_1/T_1)][1 - \exp(-t/T_1)] - t\}.\end{aligned}\quad (Б.8)$$

В другій моделі обертальний рух судна при зміні курсу визначається диференціальним рівнянням третього порядку. Де за допомогою методу простих ітерацій розраховують значення інтервалів часу τ_1 та τ_2 на першій і другій фазах повороту судна [191]:

$$\begin{aligned}\tau_1 &= \tau_2 + \{T_1^2 [1 - \exp(-\tau_1/T_1)] - T_2^2 [1 - \exp(-\tau_1/T_2)]\} / (T_1 - T_2) - \\ &- \{2 - [T_1 \exp(-\tau_1/T_1) - T_2 \exp(-\tau_1/T_2)] / (T_1 - T_2)\} \times\end{aligned}$$

$$\{T_1^2 [1 - \exp(-\tau_2/T_1)] - T_2^2 [1 - \exp(-\tau_2/T_2)]\} / (T_1 - T_2) + \Delta K_i / \omega_p,$$

$$\tau_2 = -T_1 \ln \{ (T_2/T_1) \exp(-\tau_2/T_2) + [(T_1 - T_2)/T_1] L^{-1} \}, \quad (\text{Б.9})$$

де $L = 2 - [T_1 \exp(-\tau_1/T_1) - T_2 \exp(-\tau_1/T_2)] / (T_1 - T_2)$.

T_1 та T_2 - постійні часу, що характеризують інерційність судна при обертальному русі.

В якості початкових наближень приймаються $\tau_1 = \Delta K_i / \omega_p$ та $\tau_2 = 0$. Для розрахунку приросту координат судна при повороті застосовують формули курсу на першій і другій фазах:

$$K^{(1)} = K_o + \omega_p \{ t - \{ T_1^2 [1 - \exp(-t/T_1)] - T_2^2 [1 - \exp(-t/T_2)] \} / (T_1 - T_2) \},$$

$$K^{(2)} = K^{(1)}(\tau_1) - \omega_p t + \omega_p \{ 2 - [T_1 \exp(-\tau_1/T_1) - T_2 \exp(-\tau_1/T_2)] / (T_1 - T_2) \} \times$$

$$\{ T_1^2 [1 - \exp(-t/T_1)] - T_2^2 [1 - \exp(-t/T_2)] \} / (T_1 - T_2). \quad (\text{Б.10})$$

Як приклад, виконаємо чисельну оцінку значень приросту гранично допустимої дистанції зближення $\Delta D_d^{(1)}$, $\Delta D_d^{(2)}$ та $\Delta D_d^{(3)}$ для вищерозглянутих моделей обертального руху судна для випадку, коли маневр зміною курсу виконує тільки одне з суден, а друге - зберігає початкові параметри руху. В цьому випадку приріст координат Δx_2 та Δy_2 прямолінійного руху другого судна виражаються наступним чином:

$$\Delta x_2 = V_2 \tau \sin K_2, \quad \Delta y_2 = V_2 \tau \cos K_2,$$

де τ - тривалість повороту першого судна.

Очевидно, приріст відносних координат можна оцінити такими виразами:

$$\Delta x_{ot} = \Delta x_1 - V_2 \tau \sin K_2;$$

$$\Delta y_{ot} = \Delta y_1 - V_2 \tau \cos K_2. \quad (\text{Б.11})$$

Б.2. Урахування інерційності при зміні курсів суден елементарної групи в разі формування області неприпустимих значень курсів.

Розроблена комп'ютерна програма для випадку $V_1 < V_2$ дала можливість згенерувати першу ситуацію небезпечного зближення суден з відносною позицією зближення $\alpha_{12} = 73^\circ$, $D_{12} = 3$ милі і параметрами руху суден $K_1 = 52^\circ$, $V_1 = 15$ вуз., $K_2 = 280^\circ$, $V_2 = 20$ вуз. Ситуація небезпечного зближення показана на рис. Б.3.

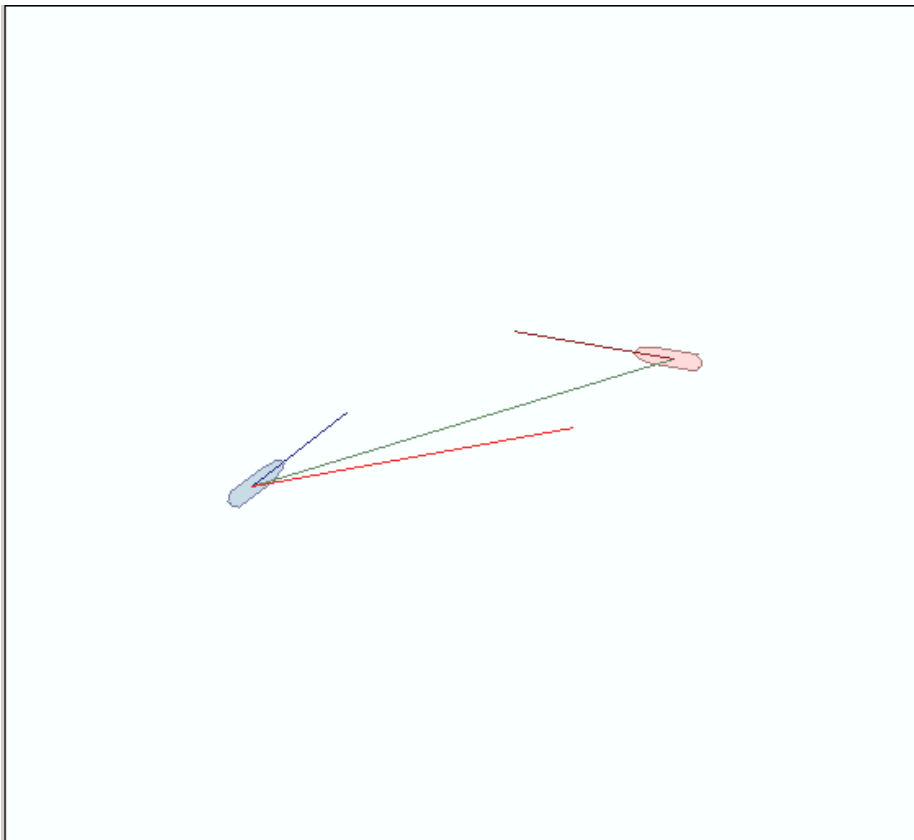


Рис. Б.3. Перша ситуація небезпечного зближення при $V_1 < V_2$

Межі області небезпечних курсів S_{Dij} без урахування інерційності суден для даної ситуації небезпечного зближення показані на рис. Б.4 червоним і

зеленим кольорами відповідно. Межі області з урахуванням інерційності суден позначені синім кольором. Межі області без урахування інерційності знаходяться всередині межі області з урахуванням її.



Рис. Б.4. Межі області S_{Dij} урахування інерційності суден

На рис. Б.5 показана друга ситуація небезпечного зближення суден для випадку $V_1 < V_2$, яка була згенерована комп'ютерною програмою і характеризується наступними параметрами: відносної позицією зближення $\alpha_{12} = 93^\circ$, $D_{12} = 2,5$ милі і параметрами руху суден $K_1 = 124^\circ$, $V_1 = 15$ вузлів, $K_2 = 257^\circ$, $V_2 = 20$ вузлів. Дана, друга, ситуація характеризується таким же співвідношенням швидкостей суден, як і в першій, однак початкова дистанція між суднами на 0,5 милі менше ніж у випадку попередньої ситуації. Для обох ситуацій величина гранично допустимої дистанції зближення D_d дорівнює 1 милі.

Прогнозоване значення дистанції найкоротшого зближення в даній ситуації дорівнює 0,17 милі, це значно менше заданої величини D_d . Робимо висновок, що зближення суден є небезпечним.

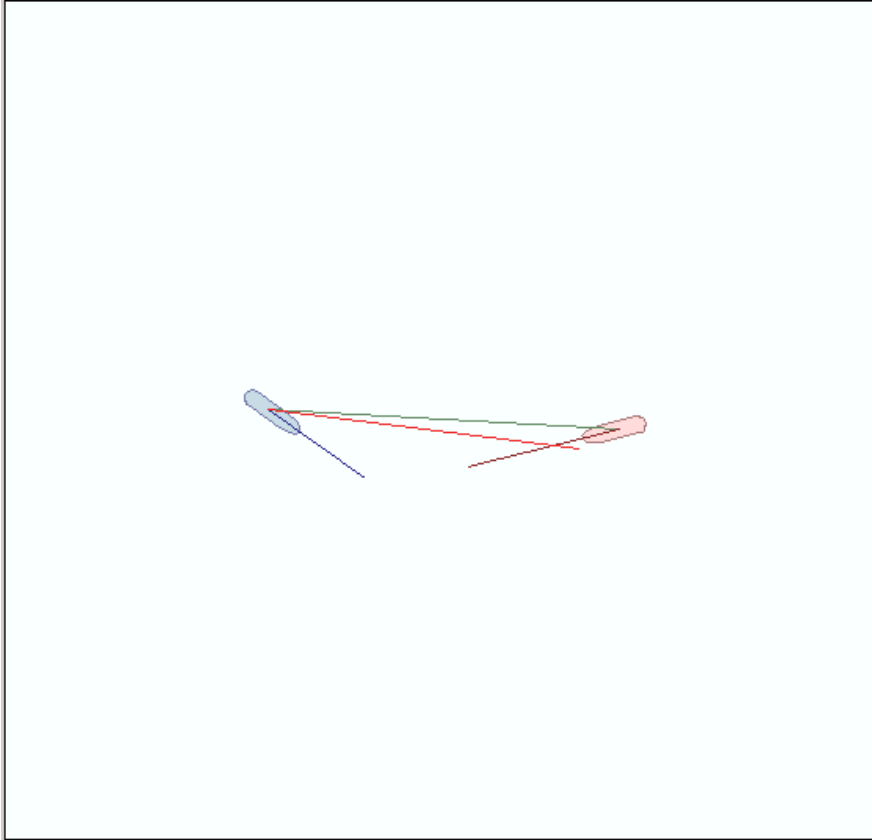


Рис. Б.5. Друга ситуація небезпечного зближення при $V_1 < V_2$

На наведеному рис. Б.5 крім лінії пеленга, що з'єднує позиції двох суден, з позиції першого судна проведена лінія відносного курсу руху. По положенню якої відносно лінії пеленга можна судити про небезпеку зближення суден. Положення лінії відносного курсу незначно відрізняється від напрямку лінії пеленга, це є свідченням про невелику дистанцію найкоротшого зближення. Для другої ситуації небезпечного зближення область небезпечних курсів S_{Dij} з урахуванням інерційності і без її обліку при повороті показана на рис. Б.6. Як і в першій ситуації небезпечного зближення, межі області небезпечних курсів без урахування інерційності суден знаходяться в межах області

з її урахуванням.



Рис. Б.6. Межі області S_{Dij} при другій ситуації зближення

При виборі безпечного курсу ухилення необхідно користуватися зовнішньою межею синього кольору. Тоді безпечний курс ухилення першого судна, якщо друге судно зберігає незмінні параметри руху, при повороті вправо дорівнює 180° , а при повороті вліво - 40° . Ці курси позначені горизонтальні лініями, які проходять через кордони області небезпечних курсів з урахуванням інерційності суден в точках їх перетину з вертикальною лінією курсу другого судна $K_2 = 257^\circ$, що зображено на рис. Б.6.

Для випадку $V_1 > V_2$ також були згенерована ситуація небезпечного зближення, яка характеризується наступними параметрами: відносної позицією зближення $^\circ$, милі і параметрами руху суден $\alpha_{12} = 74^\circ$, $D_{12} = 3,0$ милі та параметрами руху суден $K_1 = 45^\circ$, $V_1 = 20$ вузлів, $K_2 = 315^\circ$, $V_2 = 10$ вузлів,

причому $D_d = 1$ миля. Прогнозоване значення дистанції найкоротшого зближення становить 0,12 милі. Ситуація небезпечного зближення при $V_1 > V_2$ відрображена на рис. Б.7.

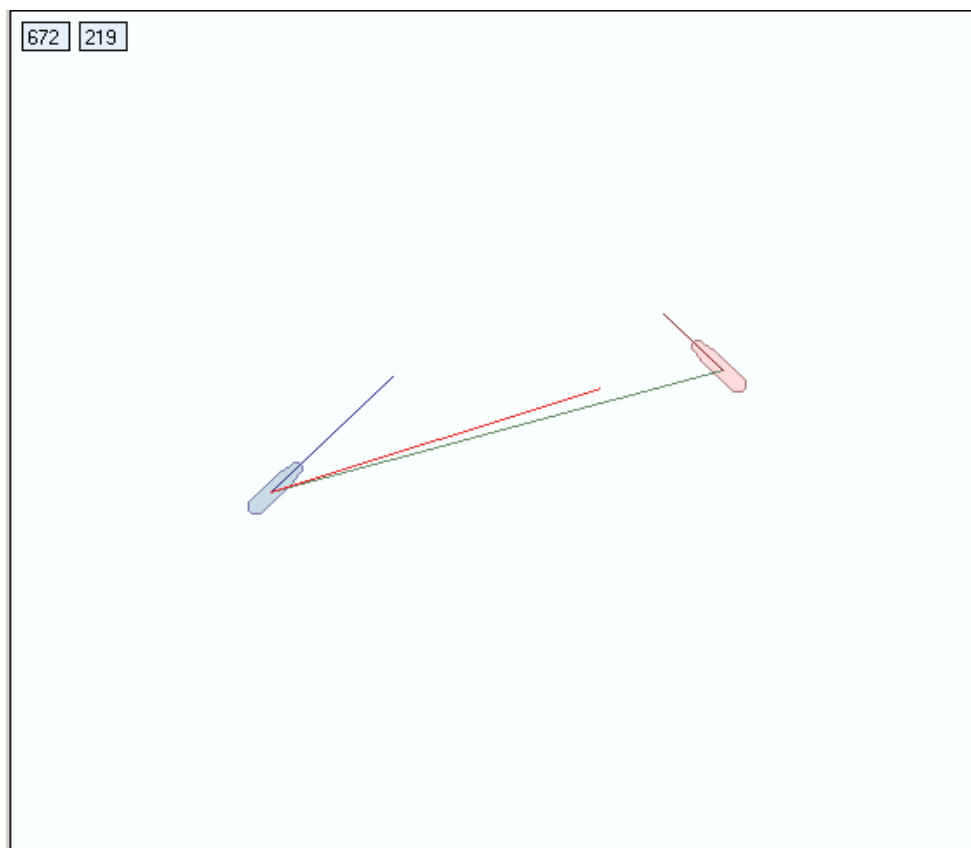


Рис. Б.7. Ситуація небезпечного зближення при $V_1 > V_2$

Для даної ситуації на рис. Б.8 показані межі області небезпечних курсів. Синім кольором показані її межі з урахуванням інерційності суден.

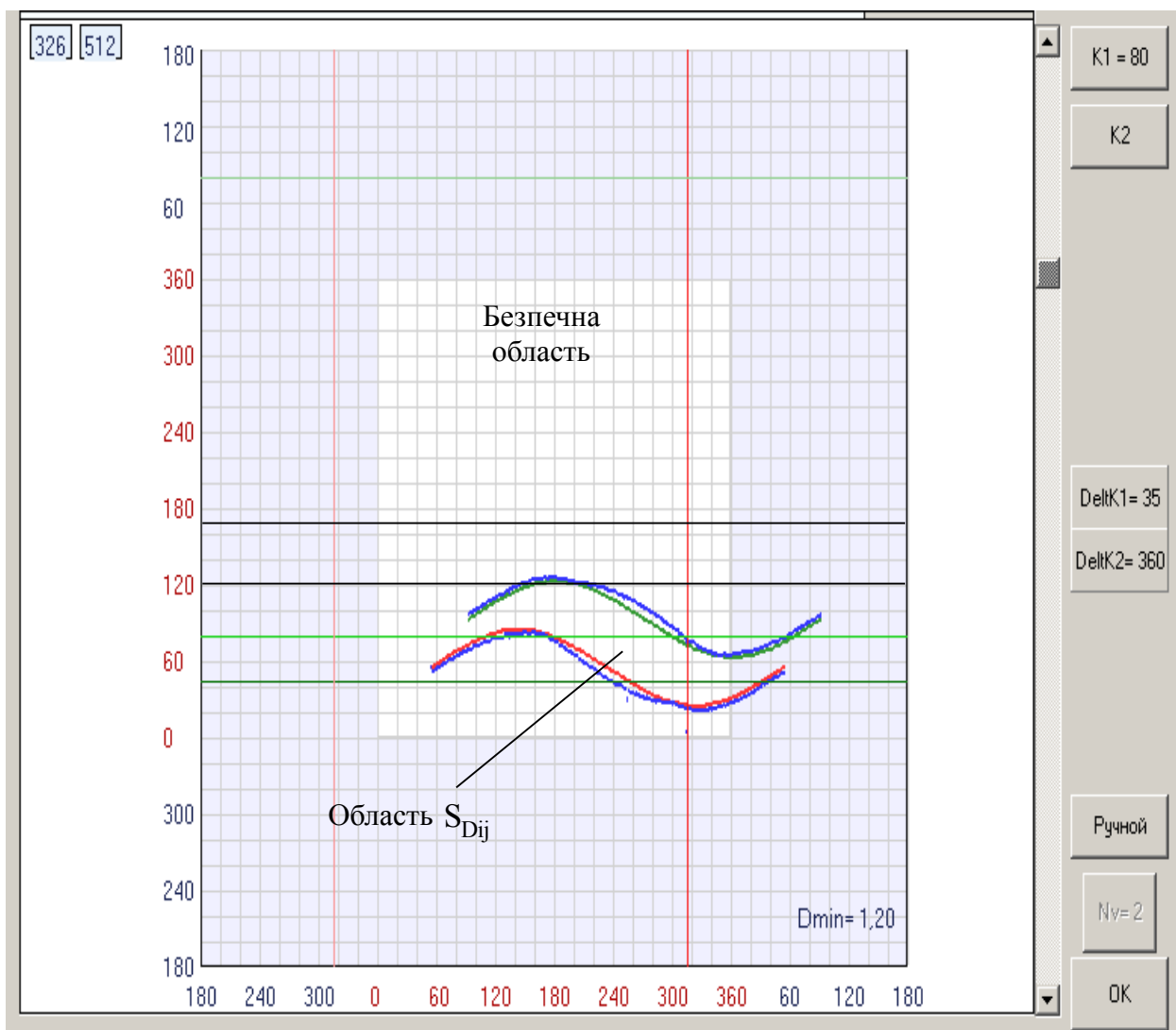


Рис. Б.8. Межі області S_{Dij} першої ситуації зближення при $V_1 > V_2$

З рисунка слідує, що ухиленням тільки першого судна при початкових параметрах руху другого судна безпечними курсами при повороті вправо є курс 80° , а при повороті вліво - 22° відповідно. Обидва зазначених курси проходять через межі області небезпечних курсів, які враховують інерційність при повороті, та показані на рис. Б.8 горизонтальними чорними лініями.

Б.3. Формування області неприпустимих значень швидкості суден з урахуванням їх інерційно – гальмівних характеристик.

При виконанні маневру зміною швидкостей пари суден розглянуті всі варіанти вибору режиму гальмування:

1. обидва судна використовують активне гальмування;
2. обидва судна використовують пасивне гальмування;
3. перше судно застосовує активне гальмування, а друге - пасивне;
4. перше судно застосовує пасивне гальмування, а друге - активне.

Для кожного з варіантів величини τ_{1y} , τ_{2y} , S_1 та S_2 першого і другого суден розраховуються за формулами (4.9) ÷ (4.13) четвертого розділу.

Порівнюючи отримані величини τ_{1y} та τ_{2y} , отримуємо характеристики для координат суден X_{mxp} , Y_{mxp} , X_{mnp} та Y_{mnp} . Якщо є справедливою нерівність $\tau_{1y} > \tau_{2y}$, то:

$$\tau_{mx} = \tau_{1y}, \tau_{mn} = \tau_{2y}, S_{mx} = S_1, S_{mn} = S_2, V_{mx} = V_1, V_{mn} = V_2, V_{mny} = V_{2y}, \\ K_{mx} = K_1, K_{mn} = K_2.$$

В разі $\tau_{1y} < \tau_{2y}$:

$$\tau_{mx} = \tau_{2y}, \tau_{mn} = \tau_{1y}, S_{mx} = S_2, S_{mn} = S_1, V_{mx} = V_2, V_{mn} = V_1, V_{mny} = V_{1y}, \\ K_{mx} = K_2, K_{mn} = K_1.$$

Використовуючи отримані параметри і задаючись швидкістю V_{1y} , починаючи зі швидкості $V_{2y} = V_2$ і зменшуючи її в кожному циклі на вибране значення ΔV_{2y} , спочатку розраховуються значення L_{mx} та L_{mn} , а потім – дистанція найкоротшого зближення D_{min} . Обчислення тривають до тих пір, поки не настане рівність $D_{min}(V_{1y}, V_{2y}) = D_d$, при якому визначається шукане значення V_{2y} . Значення швидкості V_{1y} задаються з діапазону $V_{1y} \in [V_1, V_{1min}]$, де V_{1min} – мінімальна швидкість, при якій управляється судно. Для кожного зна-

чення V_{1y} із зазначеного діапазону за описаним алгоритмом розраховується швидкість V_{2y} , задовольняє рівності $D_{\min}(V_{1y}, V_{2y}) = D_d$, в результаті чого отримаємо межу області Ω_{vj} неприпустимих значень швидкостей суден з урахуванням інерційно-гальмівних характеристик їх пасивного гальмування.

Розглянута ситуація небезпечного зближення суден із параметрами: пеленг $\alpha = 154^\circ$, дистанція $D := 4$ милі, параметри руху суден $K_1 = 237^\circ$, $K_2 = 278^\circ$, $V_1 = 15$ вузлів та $V_2 = 20$ вузлів, $D_d = 1$ миля. На рис. Б.9 показана область Ω_{vj} неприпустимих значень швидкостей суден з урахуванням інерційно-гальмівних характеристик їх пасивного гальмування, яка забарвлена в зелений колір. Якщо точка швидкостей суден V_{1y} та V_{2y} знаходиться всередині області Ω_{vj} , то їх зближення небезпечне. Тому для слід вибирати точки на межі області Ω_{vj} , для яких справедливою є рівність $D_{\min}(V_{1y}, V_{2y}) = D_d$. Так, на рис. Б.9 показана точка межі Ω_{vj} , відповідна швидкостям $V_{1y} = 13,6$ вузла та $V_{2y} = 13,2$ вузла, для яких програмою розраховано $D_{\min} = 1,00$ милі (рис. Б.9). Таким чином, за допомогою області Ω_{vj} можна визначити значення швидкостей, отриманих пасивним гальмуванням, які забезпечують безпечне на заданій дистанції.

Для цієї ж ситуації небезпечного зближення на рис. Б.10 показана область Ω_{vj} неприпустимих значень швидкостей суден з урахуванням інерційно-гальмівних характеристик їх активного гальмування. Для безпечного обрана точка на межі області Ω_{vj} , відповідна швидкостям $V_{1y} = 14,3$ вузла та $V_{2y} = 13,9$ вузла, для яких програмою розраховано $D_{\min} = 1,02$ милі (рис. Б.10).



Рис. Б.9. Область Ω_{Vj} неприпустимих значень швидкостей суден (варіант 2)

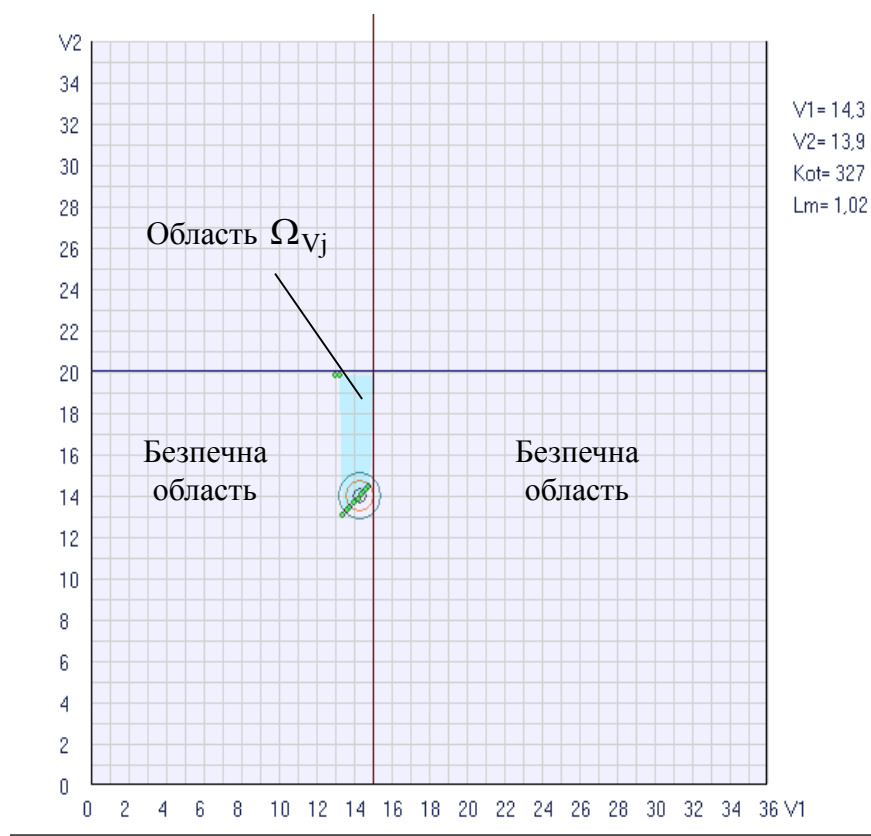


Рис. Б.10. Область Ω_{Vj} неприпустимих значень швидкостей суден (варіант 1)

На рис. Б.11 представлена область Ω_{Vj} неприпустимих значень швидкостей суден для третього варіанту гальмування суден. Безпечному розходженню відповідає точка на межі області Ω_{Vj} , зі швидкостями $V_{1y} = 13,6$ вузла та $V_{2y} = 13,0$ вузлів, при яких $D_{\min} = 1,02$ милі.

Для четвертого варіанту гальмування суден на рис. Б.12 представлена область Ω_{Vj} неприпустимих значень швидкостей суден. Точка на межі області Ω_{Vj} , зі швидкостями $V_{1y} = 14,5$ вузла та $V_{2y} = 14,2$ вузла відповідає безпечному розходженню, при якому $D_{\min} = 1,00$ милі.

Надалі розглянемо врахування динаміки суден при формуванні області неприпустимих значень курсів одного судна і швидкостей іншого судна Ω_{KVf} .

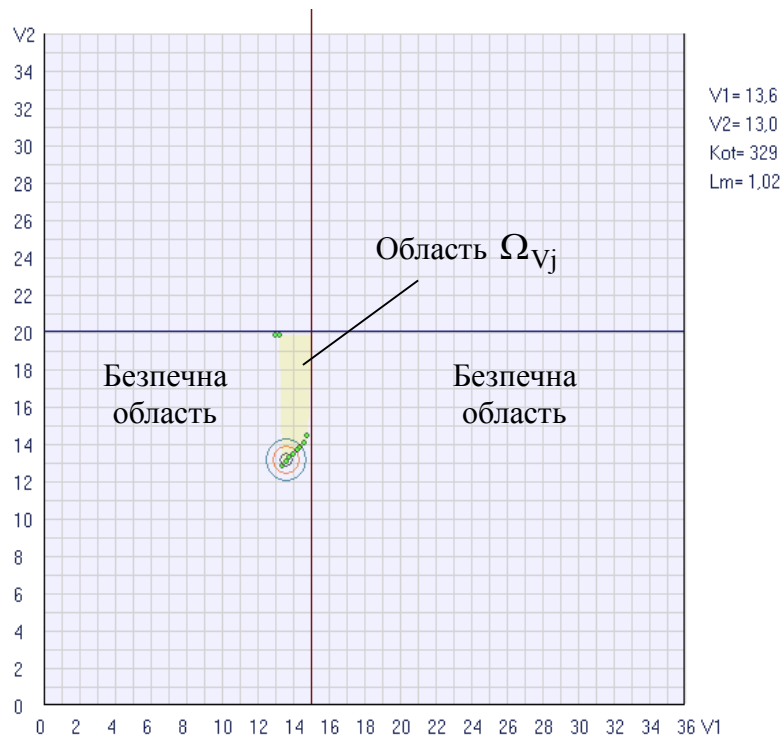


Рис. Б.11. Область Ω_{Vj} неприпустимих значень швидкостей суден (варіант 3)

Врахування інерційності повороту першого судна і інерційно-гальмівних характеристик другого судна при формуванні меж області Ω_{KVf} передбачає

для кожного курсу K_{1y} першого судна визначити швидкість гальмування другого судна V_{2y} , при якій судна розійдуться на дистанції найкоротшого зближення $D_{\min}$, що дорівнює гранично допустимій дистанції d_d . При розрахунку швидкості гальмування другого судна планується зниження його швидкості до значення V_{2y} , та проходження з цією швидкістю до моменту часу найкоротшого зближення. Потім друге судно збільшує швидкість до свого початкового значення.

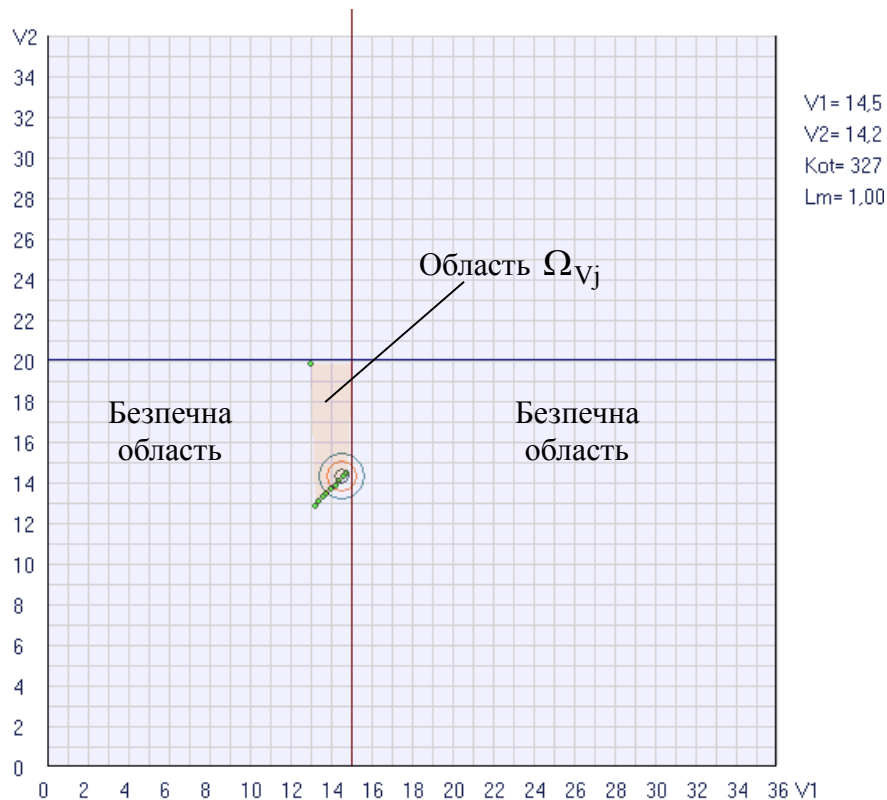


Рис. Б.12. Область Ω_{Vj} неприпустимих значень швидкостей суден (варіант 4)

Припускається, що маневри обох суден починаються в нульовий момент часу. У загальному випадку спосіб визначення кожної точки (K_{1y}, V_{2y}) межі області Ω_{KVf} полягає в наступному.

Визначається момент часу закінчення повороту t_{yk} першого судна і приріст його координат за час повороту з урахуванням динамічної моделі оберта-

льного руху. У цей момент часу визначаються поточні значення координат суден, пеленг і дистанція між суднами. Щоб визначити приріст координат другого судна необхідно визначити його зменшувану швидкість $V_{2t}(t_{yk})$ на момент часу t_{yk} , а потім середню швидкість $V_{2m} = V_2 + [V_{2t}(t_{yk}) - V_2]/2$ і пройденої відстань $S_{2m} = V_{2m}t_{yk}$.

За значеннями K_{1y} , V_1 , K_2 та $V_{2t}(t_{yk})$ визначається відносний курс і дистанція найкоротшого зближення. Коли вона є менша гранично допустимої дистанції, то значення швидкості другого судна зменшується до значення $V_{2y} = V_{2t}(t_{yk}) - 0,1$. Для цієї швидкості визначаються такі параметри: тривалість перехідного процесу, поточні значення координат, пройдена відстань, дистанція, пеленг, відносний курс і дистанція найкоротшого зближення D_{min} . Отримана дистанція найкоротшого зближення порівнюється з гранично допустимою дистанцією D_d . Якщо $D_{min} < D_d$, то величина швидкості V_{2y} знову зменшується на 0,1 вузла і знаходиться нова D_{min} , яка порівнюється з заданим D_d .

Зменшення швидкості V_{2y} з кроком 0,1 вузла виконується до того часу, поки не виконається рівність $D_{min} = D_d$. У випадку, коли при всіх $V_{2y} \geq 0$ вказана рівність не досягається, виконання маневру є неможливим зниженням швидкості другого судна. Тому для перевірки можливості безпечного розглядування маневром слід розрахувати дистанцію найкоротшого зближення для повної зупинки другого судна.

Розглянемо особливості формування межі області Ω_{KVf} при маневрі активним і пасивним гальмуванням другого судна. Для кожного з курсів ухилення першого судна вправо $K_{1y}^{(s)}$, належить інтервалу $[K_1 + 30, K_1 + 70]$, тобто $K_{1y}^{(s)} \in [K_1 + 30, K_1 + 70]$, визначається можливість безпечної зупинкою другого судна активним чи пасивним гальмуванням. Для цього передбачається, що гальмування другого судна починається в нульовий момент часу, як і

початок повороту першого судна на курс ухилення $K_{ly}^{(s)}$.

Динамічна модель обертального руху оцінює інтервал часу повороту першого судна і збільшення його координат за час повороту незалежно від режиму гальмування другого судна. Скористаємося моделлю повороту судна з постійною кутовою швидкістю у першому наближенні:

$$\tau_1 = \Delta K / a_{\omega},$$

де ΔK – приріст курсу судна, причому $\Delta K = K_{ly}^{(s)} - K_1$;

a_{ω} – кутова швидкість повороту.

За час маневрування τ_1 приріст координат Δx_o та Δy_o першого судна визначається наступними виразами, отриманими в попередньому підрозділі:

$$\Delta x_o = \frac{V_o}{a_{\omega}} (\cos K_1 - \cos K_{ly}^{(s)}),$$

$$\Delta y_o = \frac{V_o}{a_{\omega}} (\sin K_{ly}^{(s)} - \sin K_1).$$

У випадку застосування більш складних і адекватних динамічних моделей обертального руху судна необхідно враховувати дві фази повороту судна, тривалість яких Δt_k та Δt , що було детально розглянуто в попередньому підрозділі.

Після визначення приросту координат першого судна в результаті повороту для початкової швидкості другого судна V_2 і режиму гальмування (активного чи пасивного) розраховується вибіг судна S і інтервал часу τ_2 до зупинки судна. А координати першого X_1 , Y_1 і другого X_2 , Y_2 суден на момент часу зупинки другого судна приймають значення:

$$\begin{aligned}X_2 &= S \sin K_2, \quad Y_2 = S \cos K_2, \\X_1 &= D \sin \alpha - V_1 \tau_2 \sin K_1 - \Delta x_0, \\Y_1 &= D \cos \alpha - V_1 \tau_2 \cos K_1 - \Delta y_0,\end{aligned}$$

де α – початковий пеленг з другого судна на перше;

D – дистанція між суднами.

Дистанція між судами D_f на момент часу зупинки другого судна визначається виразом:

$$D_f = \sqrt{(X_1 - X_2)^2 + (Y_1 - Y_2)^2}.$$

Порівнюємо отриману дистанцію D_f з гранично допустимою дистанцією зближення D_d . Якщо $D_f < D_d$, то зупинкою другого судна неможливе, і точка межі області Ω_{KVj} з координатами $(K_{ly}^{(s)} V_2)$ не існує. В іншому випадку ($D_f > D_d$) розраховуємо дистанцію найкоротшого зближення першого судна із зупиненим другим судном $D_{\min f}$:

$$D_{\min f} = \left| D_f \sin[\alpha_f - K_{ly}^{(s)}] \right|,$$

де α_f – пеленг на друге судно в момент його зупинки.

У разі $D_{\min f} > D_d$ можливе зниження швидкості другого судна до певного значення V_{2y} , при якому виконується рівність:

$$D_{\min f}(V_{2y}) = D_d.$$

Значення швидкості V_{2y} розраховується методом послідовних набли-

жень, в якому швидкість гальмування другого судна приймається рівною $V_{2y} = V_2 - 0,1 * i$ на кожному i -му циклі обчислень. Тривалість перехідного процесу $\tau(V_{2y})$ і пройдена за цей час відстань $S(V_{2y})$ для активного і пасивного гальмування розраховуються за допомогою виразів, наведених в четвертому розділі:

$$\tau(V_{2y}) = \frac{(1+k)m}{\sqrt{\mu P}} [\operatorname{arctg}(\frac{\sqrt{\mu}}{\sqrt{P}} V_2) - \operatorname{arctg}(\frac{\sqrt{\mu}}{\sqrt{P}} V_{2y})],$$

$$S(V_{2y}) = \frac{(1+k)m}{2\mu} \ln \left| \frac{V_2^2 + \frac{P}{\mu}}{V_{2y}^2 + \frac{P}{\mu}} \right|,$$

де $(1+k)m$ – маса другого судна з приєднаними масами води;

P – упор гвинта судна;

μ – коефіцієнт опору.

При пасивному гальмуванні використовується вираз:

$$\tau(V_{2y}) = \frac{(1+k)m}{\mu V_2} \left(\frac{V_2}{V_{2y}} - 1 \right),$$

$$S(V_{2y}) = \frac{(1+k)m}{2\mu} \ln \left| \frac{V_2^2}{V_{2y}^2} \right|.$$

Процес обчислень триває до тих пір, поки не настає справедливості рівності:

$$D_{\min f}(V_{2y}) = D_d.$$

Таким чином проводиться розрахунок точок межі для всіх курсів $K_{ly}^{(s)}$

ухилення першого судна $K_{ly}^{(s)} \in [K_1 + 30, K_1 + 70]$. Аналогічно проводиться розрахунок меж області Ω_{KVf} для курсів ухилення судна вліво.

Для формування області Ω_{KVf} небезпечних курсів одного судна і швидкостей другого судна з урахуванням інерційно-гальмівних характеристик другого судна було розроблено комп'ютерну програму, яка реалізує запропонований в роботі алгоритм розрахунку меж області.

Б.4. Формування області неприпустимих значень параметрів руху суден елементарної групи при зміні швидкості з урахуванням їх інерційно-гальмівних характеристик.

На рис. Б.13 приведена ситуація небезпечного зближення, для якої сформуємо область Ω_{KVf} небезпечних курсів одного судна і швидкостей другого судна.

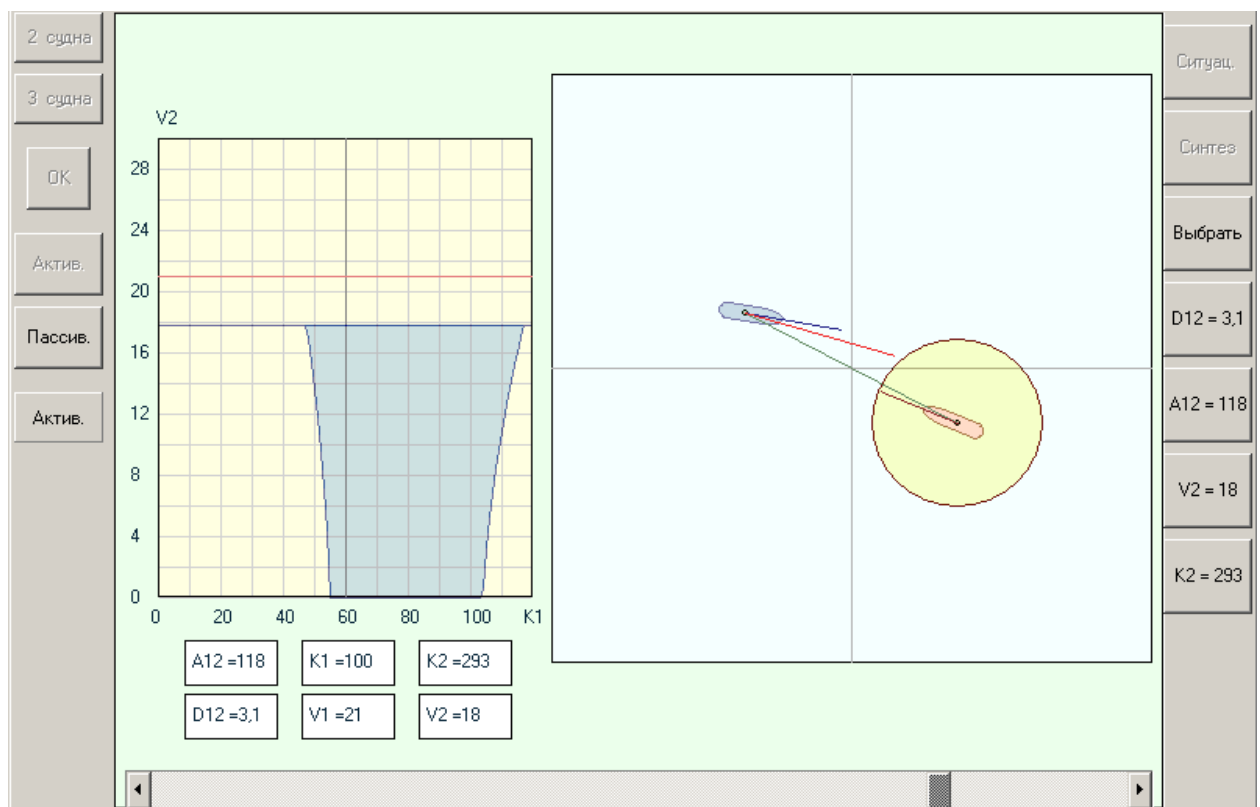


Рис. Б.13. Ситуація небезпечного зближення

На рис. Б.14 показана область неприпустимих значень курсів першого судна і швидкостей другого судна, коли воно знижує швидкість пасивним гальмуванням. Якщо вибрати зниження швидкості другим судном активним гальмуванням, то область неприпустимих значень параметрів руху суден приймає форму, яка показана на рис. Б.15. Зауважимо, що область не симетрична щодо початкового курсу першого судна.

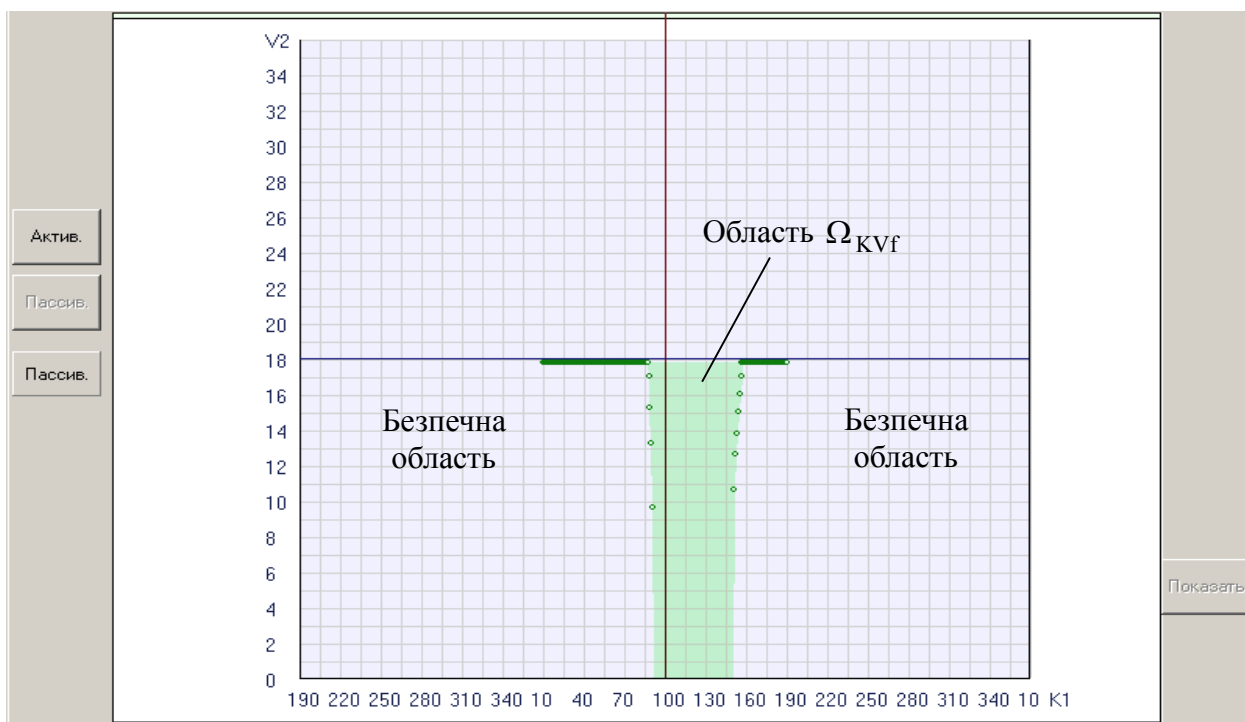


Рис. Б.14. Область Ω_{KVf} при пассивному гальмуванні

Для вибору безпечного маневру розходження необхідно «клікнути» курсором на межі області недопустимих параметрів, при цьому обрана точка відображається чотирма концентричними колами, як показано на рис. Б.16.

Значення курсу ухилення першого судна, рівного 150° , і швидкості другого судна 9,7 вузла, яке досягається активним гальмуванням, також виводяться на екран монітору.

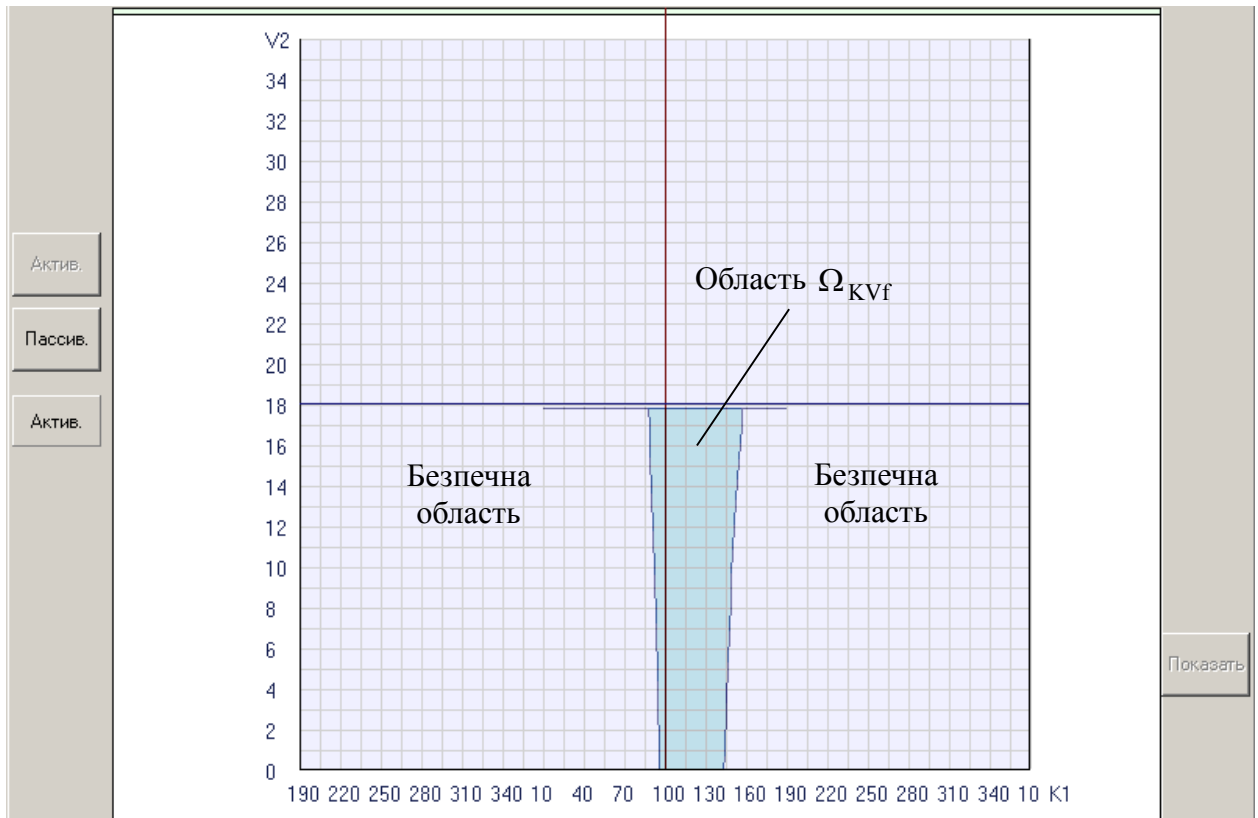


Рис. Б.15. Область параметров Ω_{KVf} при активном гальмуванні

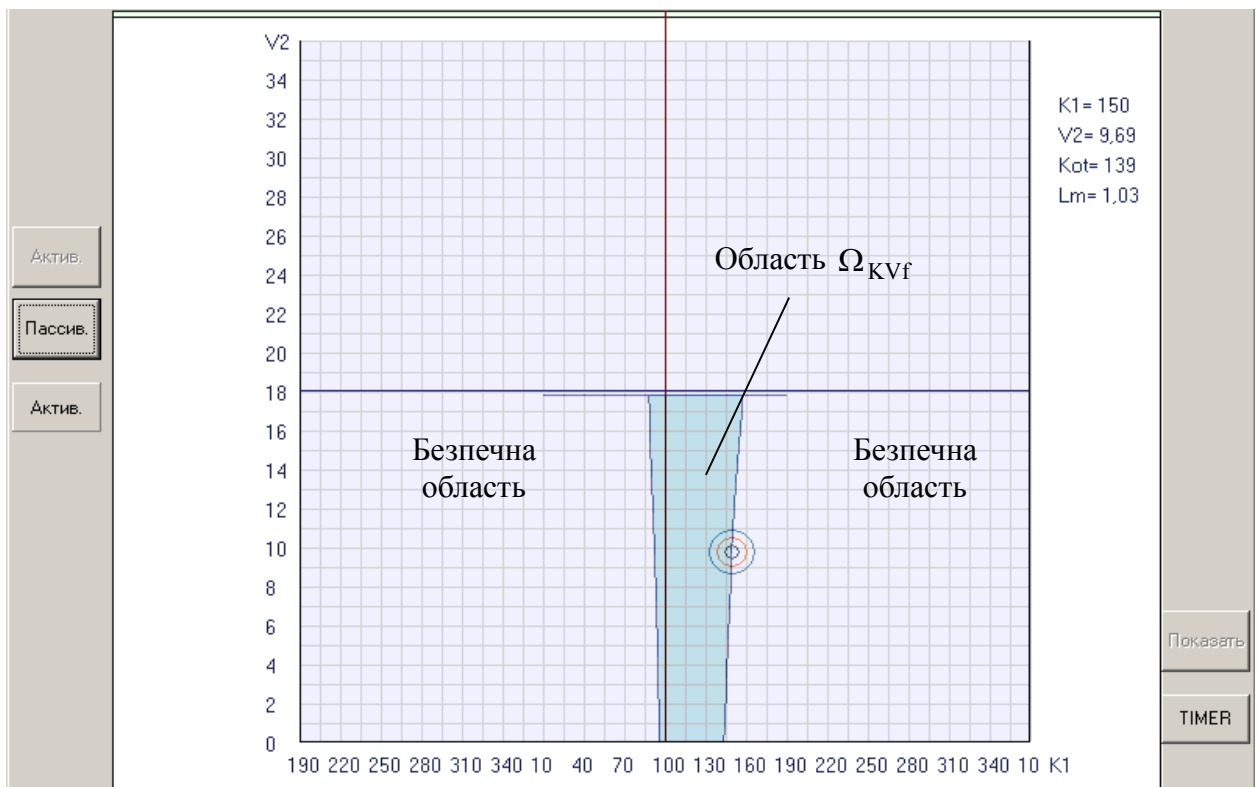


Рис. Б.16. Вибір безпечного маневру розходження

ДОДАТОК В

В.1. Вибір маневру розходження в ситуації небезпечного зближення суден при наявності третього судна, що заважає.

Як приклад на рис. В.1 приведена перша ситуація небезпечного зближення суден при наявності третього судна, що заважає, яка характеризується параметрами: $\alpha_{12}=313^\circ$, $D_{12}=3$ милі, $K_1=339^\circ$, $V_1=22$ вузли, $K_2=102^\circ$, $V_2=18$ вузлів, $d_d=1$ миля, $\alpha_{13}=25^\circ$, $D_{13}=3$ милі, $K_3=224^\circ$, $V_3=18$ вузлів. Зниження швидкості другим судном здійснюється активним гальмуванням.

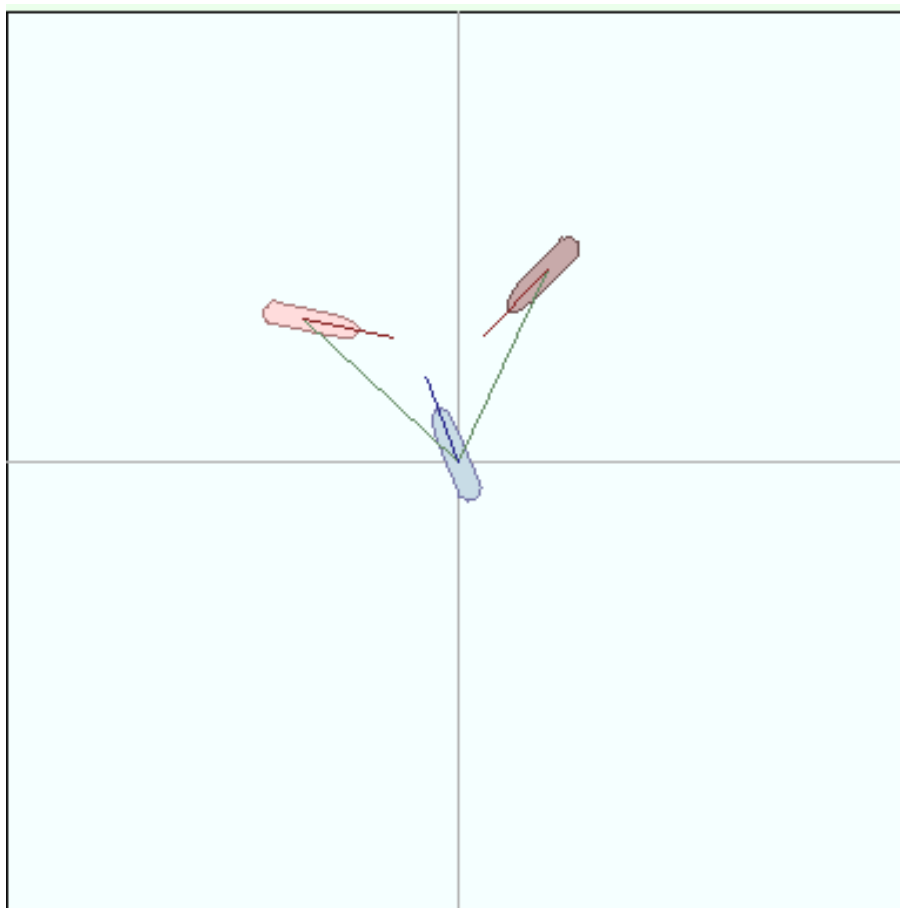


Рис. В.1. Перша ситуація зближення трьох суден

На рис. В.2 показана область Ω_{KVj} небезпечних параметрів курсу першого судна і швидкості другого судна для наведеної ситуації зближення трьох суден. Обрано маневр розходження, що відповідає точці межі області Ω_{KVj} с

параметрами $K_{1y}=4^\circ$, $V_{2y}=13,9$ вузла. За допомогою відповідних виразів програмою були розраховані дистанції найкоротшого зближення $\min D_{13}(K_{1y})=0,16$ милі та $\min D_{23}(V_{2y})=0,60$ милі, які менше гранично допустимої дистанції зближення. Дану обставину на рис. В.2 відображено в червоному кольорі інформаційних панелей виведення дистанцій найкоротшого зближення.

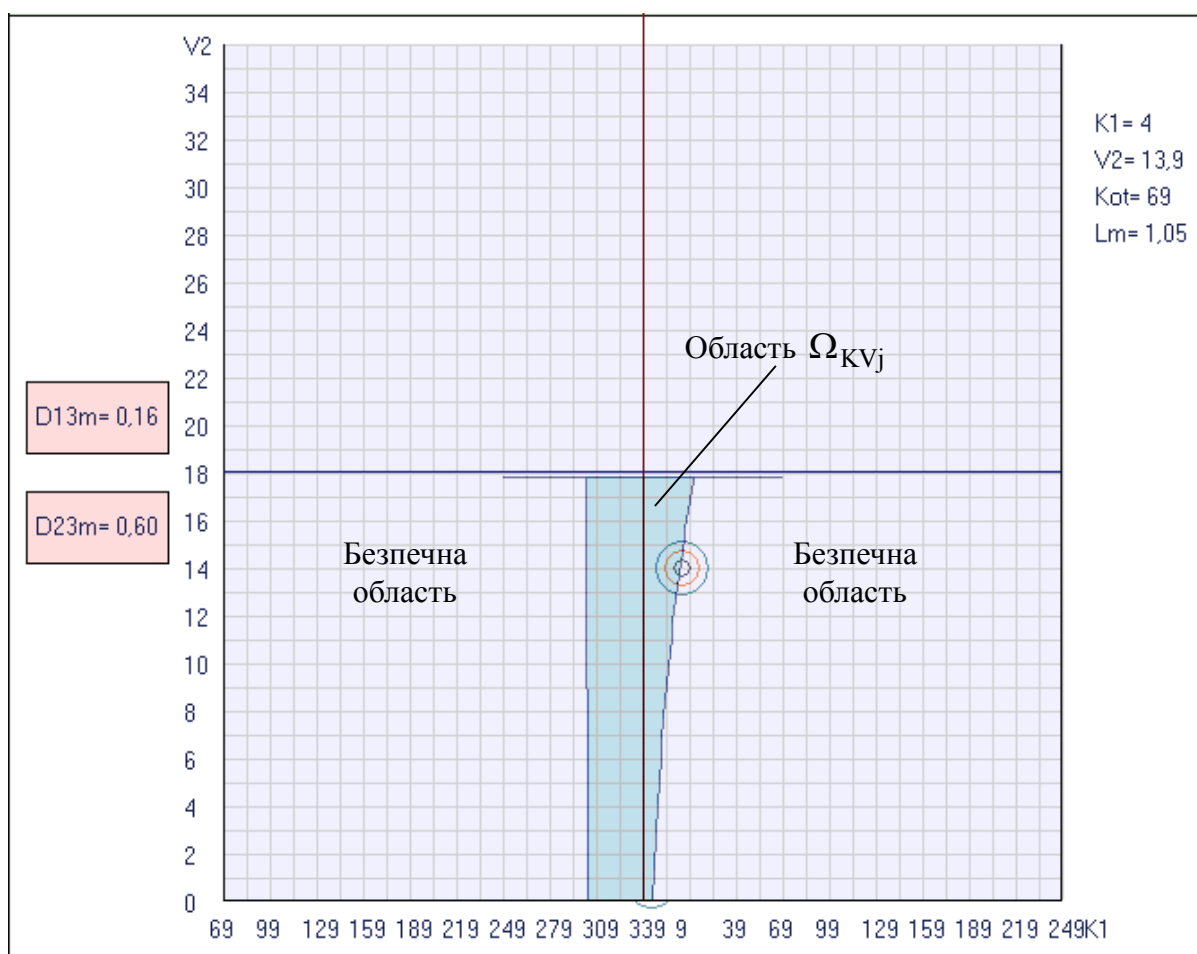


Рис. В.2. Вибір маневру розходження, небезпечного для третього судна

На рис. В.3 вибрано інший маневр розходження з параметрами $K_{1y}=349^\circ$ та $V_{2y}=4,5$ вузла. В цьому випадку дистанція найкоротшого зближення $\min D_{13}(K_{1y})=0,59$ милі та $\min D_{23}(V_{2y})=1,20$ милі. Такий маневр розходження також є неприйнятним, тому що при допустимих дистанціях найкоротшого

зближення $\min D_{12}(K_{1y}, V_{2y})$ та $\min D_{23}(V_{2y})$ дистанція $\min D_{13}(K_{1y})$ не забезпечує безпечне розходження суден.

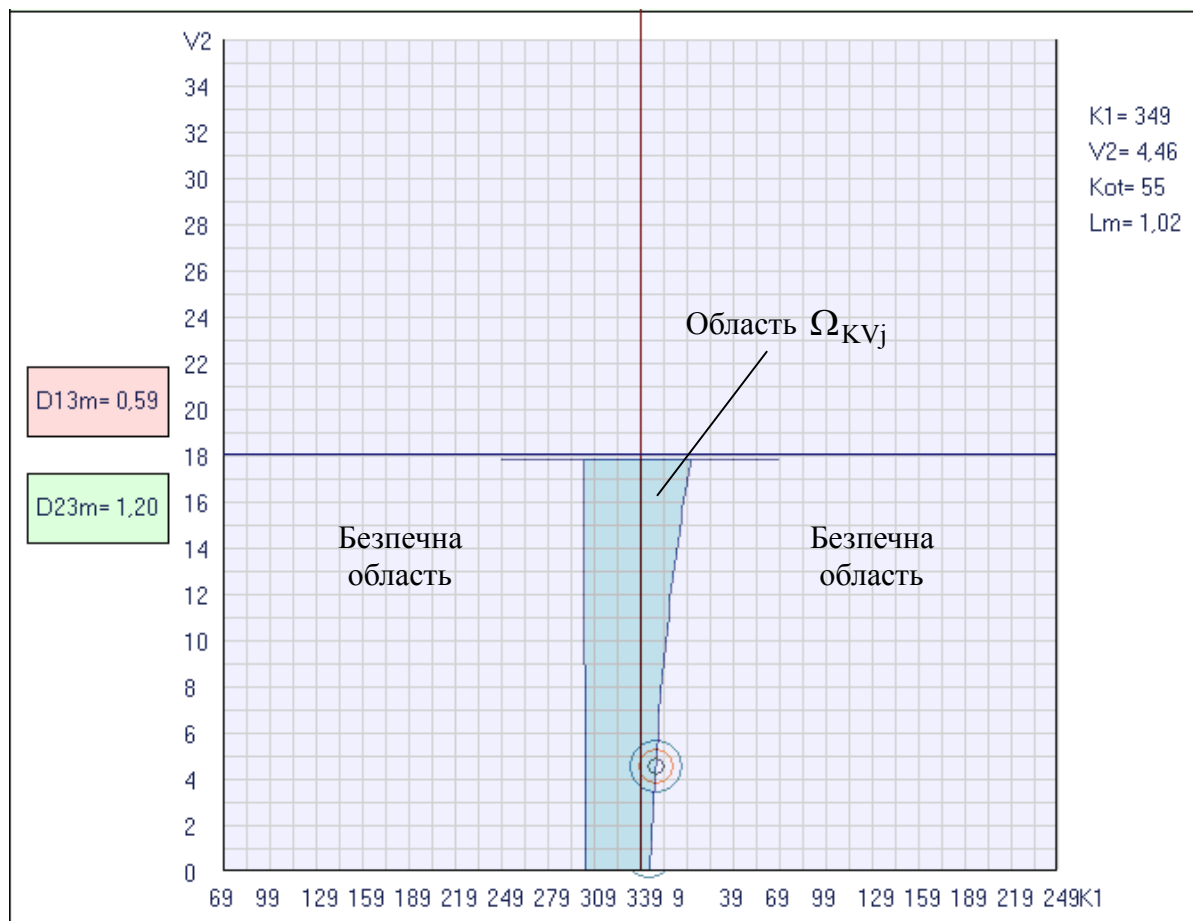


Рис. В.3. Маневр з одним небезпечним зближенням

Тому була здійснена ще одна спроба вибору безпечного маневру розходження, результати якої показані на рис. В.4. На межі області Ω_{KVj} вибрано маневр з параметрами $K_{1y} = 296^\circ$ та $V_{2y} = 7,15$ вузла. Як впливає з рисунку, перше і друге судна розходяться на дистанції 1,08 милі, дистанції $\min D_{13}(K_{1y}) = 2,04$ милі та $\min D_{23}(V_{2y}) = 1,03$ милі перевищують гранично допустиму дистанцію зближення. Обраний маневр безпечний для всіх трьох суден, це підтверджується зеленим кольором інформаційних панелей дистанцій найкоротшого зближення.

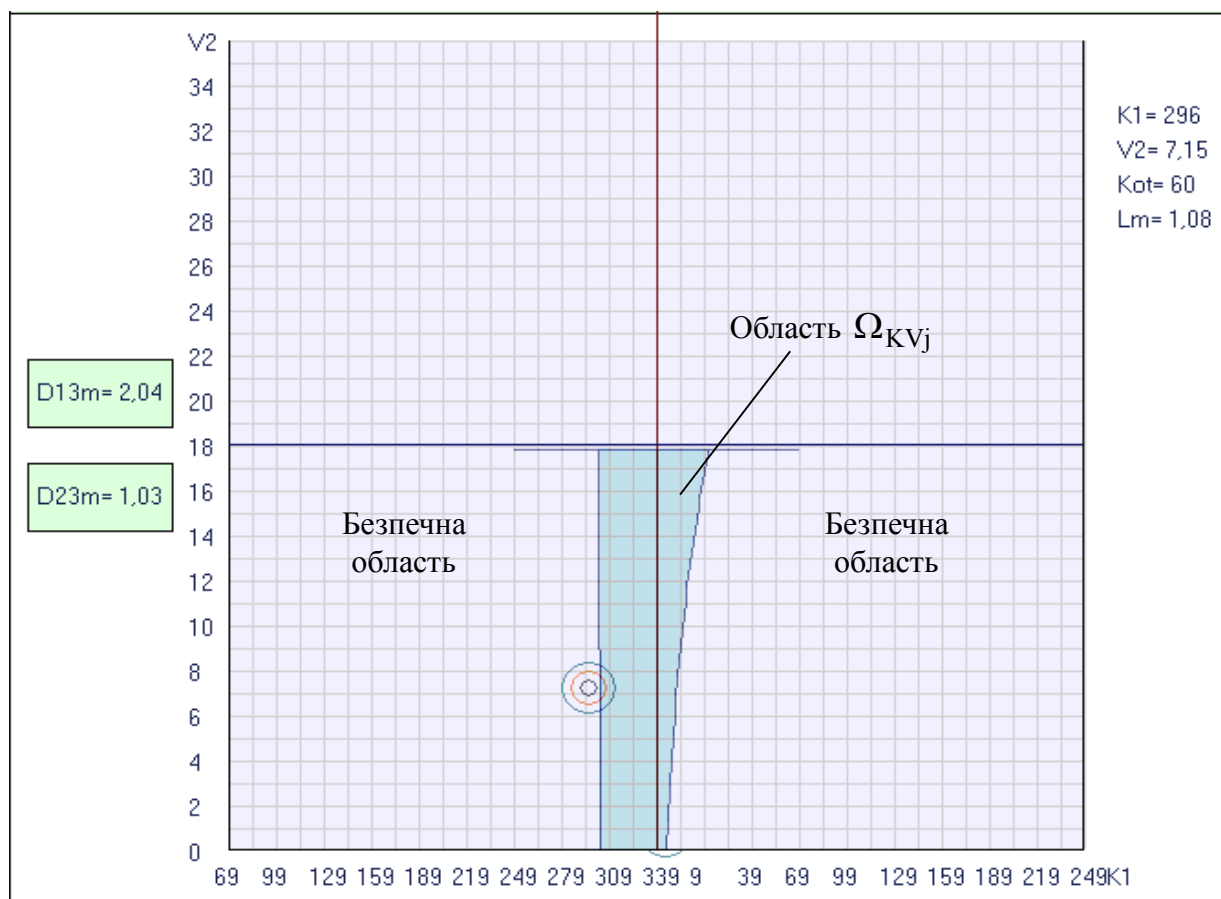


Рис. В.4. Маневр розходження безпечний для всіх суден

Розглянемо другу ситуацію зближення трьох суден, коли друге судно застосовує пасивне гальмування для зниження швидкості, графічне відображення якої представлено на рис. В.5.

Обрана ситуація характеризується параметрами: $\alpha_{12} = 144^\circ$, $D_{12} = 3$ милі, $K_1 = 130^\circ$, $V_1 = 22$ вузли, $K_2 = 315^\circ$, $V_2 = 18$ вузлів, $d_d = 1$ миля, $\alpha_{13} = 67^\circ$, $D_{13} = 3$ милі, $K_3 = 225^\circ$, $V_3 = 18$ вузлів. Зниження швидкості здійснюється пасивним гальмуванням.

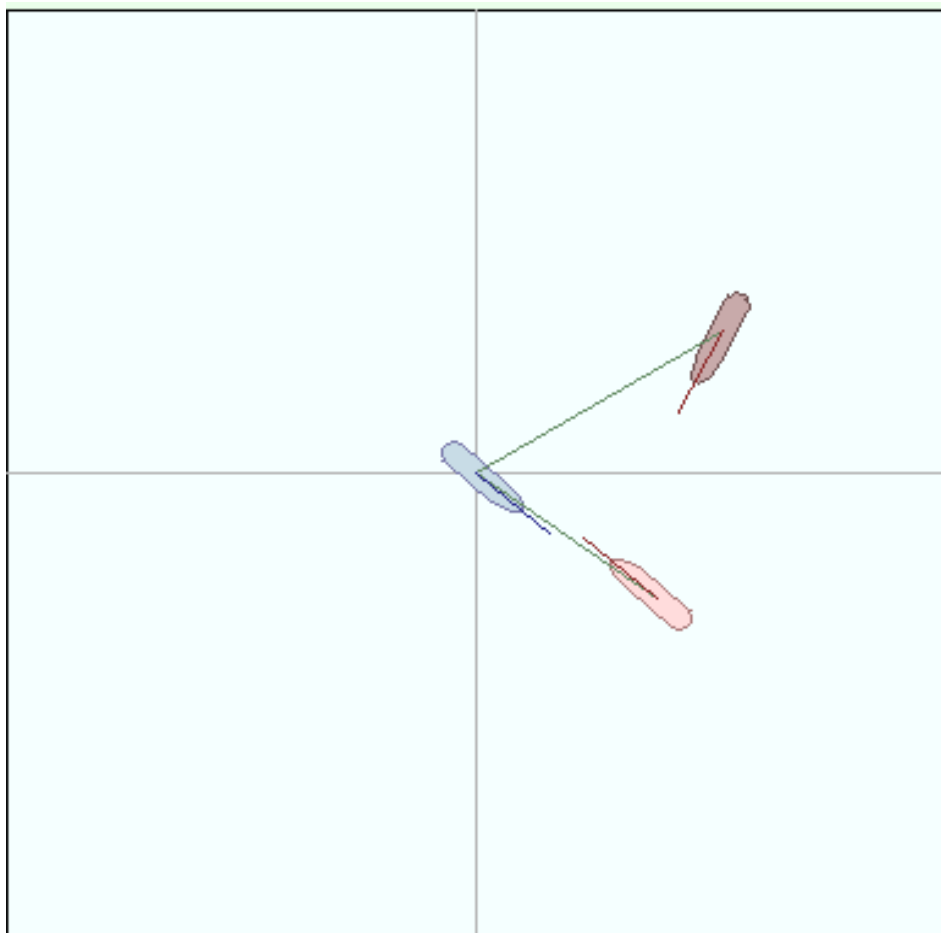


Рис. В.5. Друга ситуація зближення трьох суден

На рис. В.6 показана область Ω_{KVj} розглядуваної ситуації зближення трьох суден для пасивного гальмування і зроблений вибір маневру розходження з параметрами $K_{1y}=91^\circ$ та $V_{2y}=11,9$ вузла. Якщо дистанції найкоротшого зближення $\min D_{12}(K_{1y}, V_{2y})=1,00$ милі та $\min D_{23}(V_{2y})=1,11$ милі є допустимими, то дистанція найкоротшого зближення $\min D_{13}(K_{1y})=0,20$ не забезпечує безпечного розходження першого і третього суден.

При виборі маневру розходження з параметрами $K_{1y}=153^\circ$ та $V_{2y}=11$ вузлів дистанції найкоротшого зближення всіх суден, як впливає з рис. В.7, не є меншими за гранично допустиму дистанцію зближення. Тому даний маневр є безпечним.

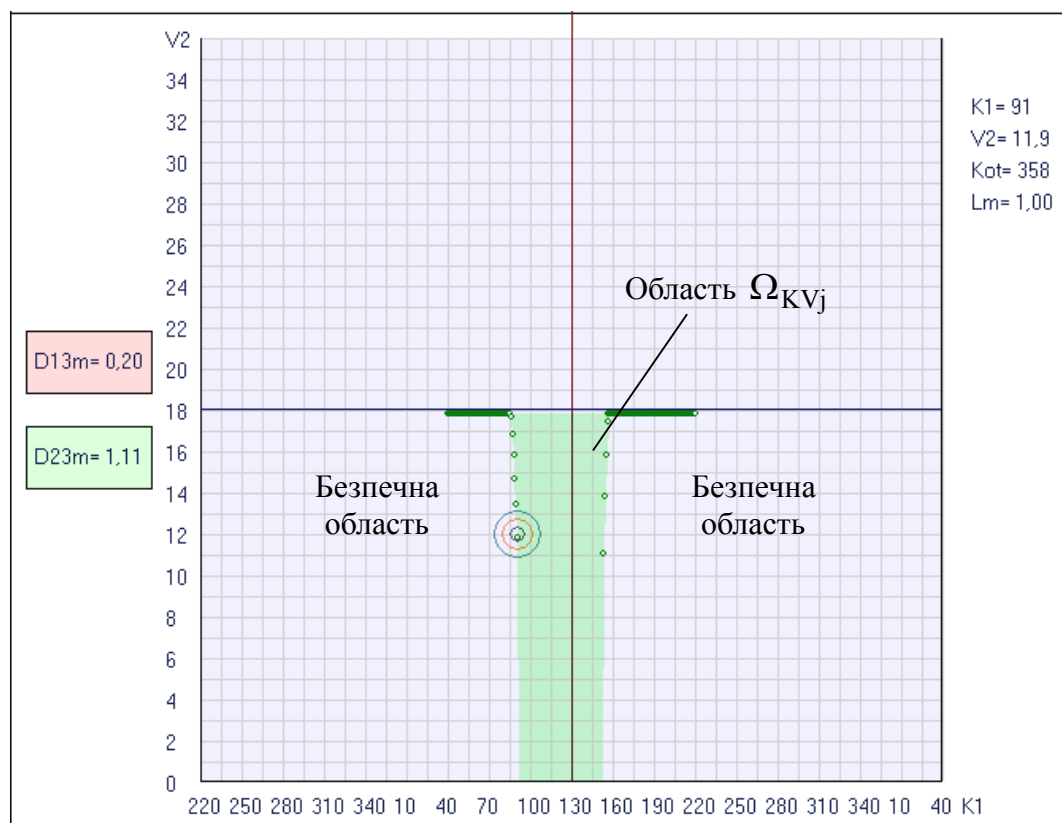


Рис. В.6. Маневр з небезпечним зближенням першого і третього суден

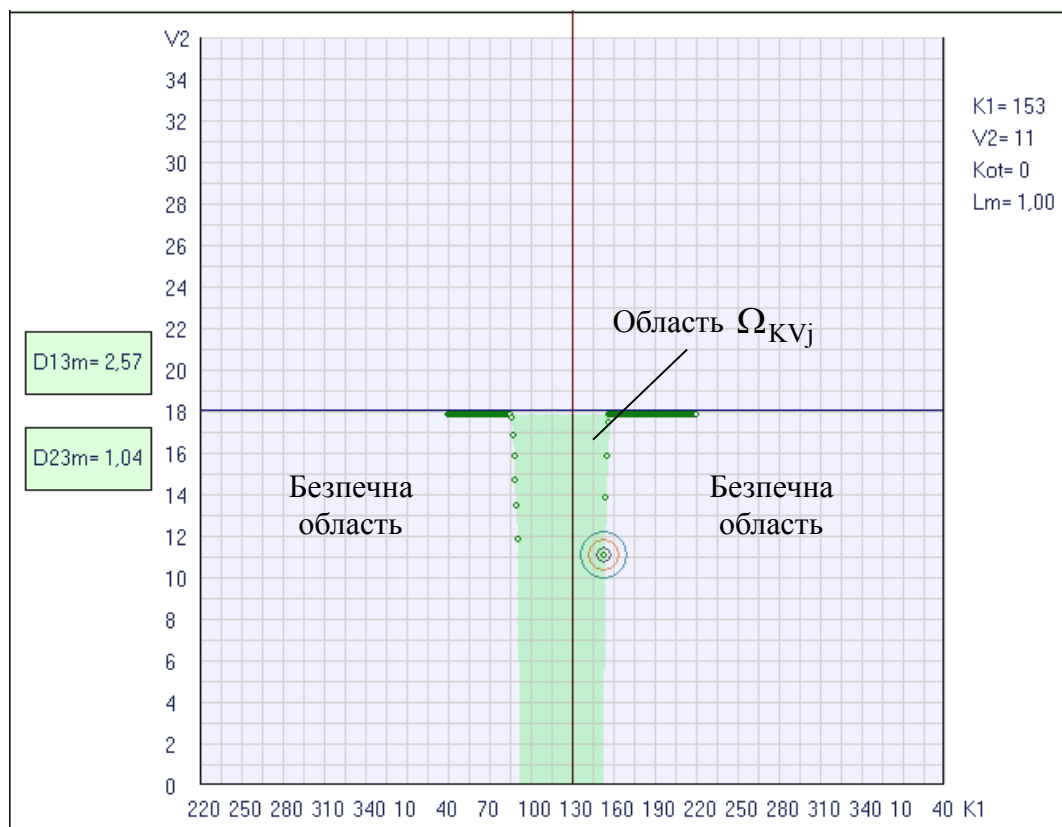


Рис. В.7. Безпечний маневр розходження трьох суден

В.2. Пошук оптимального вектору керування групою, що складається з чотирьох суден

Для встановлення загального принципу пошуку оптимального керуючого вектору при довільній кількості суден в взаємодіючій групі розглянемо групу, що складається з чотирьох суден. В цьому випадку матриця ситуаційного збурення містить 6 елементів, що характеризують наявність ситуаційного збурення між кожною парою суден ω_{12} , ω_{13} , ω_{14} , ω_{23} , ω_{24} і ω_{34} . Аналогічно попередньому випадку групи трьох суден можливі різні структури матриці ситуаційного збурення в залежності від числа ситуаційних збурень рівних одиниці.

Очевидно, якщо тільки одне збурення дорівнює 1, а інші рівні 0, то реалізується структура матриці $St_4^{(1)}$. Наприклад, має місце наступна структура $St_4^{(1)}(\omega_{12})$: $\omega_{12}=1$, $\omega_{13}=\omega_{14}=\omega_{23}=\omega_{24}=\omega_{34}=0$.

Дане ситуаційне збурення буде компенсовано при перетворюванні елементарного ситуаційного збурення ω_{12} в 0, що в принципі можливо зміною одного з курсів K_1 або K_2 .

Якщо компенсація ситуаційного збурення ω_{12} проводиться курсом K_1 , то необхідно, щоб всі ситуаційні збурення, що знаходяться в одному рядку матриці збурення з ситуаційним збуренням ω_{12} , тобто ω_{1i} ($i > 1$), при зміні K_1 не прийняли значення 1. Іншими словами, повинна виконуватися умова $^{(1)}G_4^{(1)}$:

$$\begin{aligned} \Delta K_1 &\rightarrow \min, \\ (K_{n1} + \Delta K_1, K_{n2}) &\notin S_{D12}, \\ (K_{n1} + \Delta K_1, K_{n3}) &\notin S_{D13}, \\ (K_{n1} + \Delta K_1, K_{n4}) &\notin S_{D14}. \end{aligned} \tag{B.1}$$

При компенсації ситуаційного збурення ω_{12} курсом K_2 одночасно з ω_{12} можуть змінитися ситуаційні збурення ω_{2i} ($i > 2$), які знаходяться в одному стовпці з ω_{12} в матриці ситуаційного збурення W_{bn} . Тому вибір зміни курсу ΔK_2 проводиться з урахуванням умови $^{(1)}G_4^{(2)}$:

$$\begin{aligned} \Delta K_2 &\rightarrow \min, \\ (K_{n1}, K_{n2} + \Delta K_2) &\notin S_{D12}, \\ (K_{n2} + \Delta K_2, K_{n3}) &\notin S_{D23}, \\ (K_{n2} + \Delta K_2, K_{n4}) &\notin S_{D24}. \end{aligned} \quad (B.2)$$

Якщо компенсація ситуаційного збурення можлива зміною тільки курсу K_1 або тільки курсу K_2 , то вибираємо маневр, у якого зміна курсу менше.

Якщо компенсація зміною одного курсу неможлива, то слід змінювати одночасно обидва курси K_1 і K_2 . При цьому, компенсуючи ω_{12} , необхідно попередити перетворення в 1 всіх ситуаційних збурень, що містять в нижньому індексі 1 або 2, тобто перебувають в одному рядку і в одному стовпці з ω_{12} в матриці ситуаційного збурення W_{bn} . У цьому випадку умова компенсації ситуаційного збурення $^{(1)}G_4^{(1,2)}$ має вигляд:

$$\begin{aligned} Q_3^{(1,2)} &= (\Delta K_1^2 + \Delta K_2^2) \rightarrow \min, \\ (K_{n1} + \Delta K_1, K_{n2} + \Delta K_2) &\notin S_{D12}, \\ (K_{n1} + \Delta K_1, K_{n3}) &\notin S_{D13}, \\ (K_{n1} + \Delta K_1, K_{n4}) &\notin S_{D14}, \\ (K_{n2} + \Delta K_2, K_{n3}) &\notin S_{D23}, \\ (K_{n2} + \Delta K_2, K_{n4}) &\notin S_{D24} \end{aligned} \quad (B.3)$$

Аналогічно розглядаються інші варіанти структури $St_4^{(1)}(\omega_{ij})$ матриці ситуаційного збурення.

У разі якщо два елементарних ситуаційних збурення рівні 1, то має місце структура $St_4^{(2)}$ матриці ситуаційного збурення. Для вивчення особливостей вибору оптимального вектору управління при виникненні такої структури вважаємо, що реалізувався один з її варіантів ($\omega_{12}=\omega_{13}=1$, $\omega_{14}=\omega_{23}=\omega_{24}=\omega_{34}=0$).

Компенсація ситуаційних збурень ω_{12} і ω_{13} зміною тільки одного курсу можлива, якщо таким курсом є K_1 . Однак при цьому ситуаційне збурення повинно зберігати значення рівне 0. На інші ситуаційні збурення, значення яких дорівнює 0, зміна курсу K_1 не впливає. Тому умова $^{(2)}G_4^{(1)}$ перетворення матриці ситуаційного збурення W_{b4} в нульову матрицю має вигляд:

$$\begin{aligned} \Delta K_1 &\rightarrow \min, \\ (K_{n1} + \Delta K_1, K_{n2}) &\notin S_{D12}, \\ (K_{n1} + \Delta K_1, K_{n3}) &\notin S_{D13}, \\ (K_{n1} + \Delta K_1, K_{n4}) &\notin S_{D14}. \end{aligned} \tag{B.4}$$

Якщо дана умова $^{(2)}G_4^{(1)}$ зміною курсу K_1 не виконується, то для компенсації ситуаційних збурень ω_{12} і ω_{13} необхідно використовувати зміну одночасно двох курсів. Очевидно, що в цьому випадку можуть бути використані пари курсів, індекси яких містяться в індексах, що компенсуються ситуаційні збурення. В даному випадку є три пари таких курсів (K_1, K_2) , (K_1, K_3) и (K_2, K_3) .

При зміні пари курсів (K_1, K_2) на величину ΔK_1 і ΔK_2 ситуаційне збурення ω_{12} залежить від обох курсів, а на ситуаційне збурення впливає курс

K_1 . При цьому необхідно зберегти нульові значення ситуаційних збурень ω_{14} , ω_{23} і ω_{24} , на які впливають зміни даної пари курсів.

Умова $^{(2)}G_4^{(1,2)}$ перетворення матриці ситуаційного збурення в нульову матрицю виражається наступним чином:

$$\begin{aligned} Q_4^{(1,2)} &= (\Delta K_1^2 + \Delta K_2^2) \rightarrow \min, \\ (K_{n1} + \Delta K_1, K_{n2} + \Delta K_2) &\notin S_{D12}, \\ (K_{n1} + \Delta K_1, K_{n3}) &\notin S_{D13}, \\ (K_{n1} + \Delta K_1, K_{n4}) &\notin S_{D14}, \\ (K_{n2} + \Delta K_2, K_{n3}) &\notin S_{D23}, \\ (K_{n2} + \Delta K_2, K_{n4}) &\notin S_{D24}. \end{aligned} \quad (B.5)$$

Якщо для перетворення матриці ситуаційного збурення в нульову вибрати пару курсів (K_1, K_3) зі змінами ΔK_1 і ΔK_3 , то ситуаційне збурення залежить ω_{12} від курсу K_1 , а на ситуаційне збурення ω_{13} впливають обидва курси. Величини змін ΔK_1 і ΔK_3 слід вибирати так, щоб зберегти нульові значення ситуаційних збурень ω_{14} , ω_{23} і ω_{34} , на які впливають зміни курсів K_1 і K_3 . При цьому умова $^{(2)}G_4^{(1,3)}$ перетворення матриці W_{b4} в нульову матрицю виглядає так:

$$\begin{aligned} Q_4^{(1,3)} &= (\Delta K_1^2 + \Delta K_3^2) \rightarrow \min, \\ (K_{n1} + \Delta K_1, K_{n2}) &\notin S_{D12}, \\ (K_{n1} + \Delta K_1, K_{n3} + \Delta K_3) &\notin S_{D13}, \\ (K_{n1} + \Delta K_1, K_{n4}) &\notin S_{D14}, \\ (K_{n2}, K_{n3} + \Delta K_3) &\notin S_{D23}, \\ (K_{n3} + \Delta K_3, K_{n4}) &\notin S_{D34}. \end{aligned} \quad (B.6)$$

У разі використання пари курсів (K_2, K_3) для компенсації ситуаційних збурень ω_{12} і ω_{13} величини змін курсів ΔK_2 і ΔK_3 вибираються так, щоб поряд з перетворенням значень ω_{12} і ω_{13} в нульові зберігалися нульові значення ситуаційних збурень ω_{23} , ω_{24} і ω_{34} . Отже, умова $^{(2)}G_4^{(2,3)}$ перетворення матриці ситуаційного збурення W_{b4} в нульову матрицю має вигляд:

$$\begin{aligned} Q_4^{(2,3)} &= (\Delta K_2^2 + \Delta K_3^2) \rightarrow \min, \\ (K_{n1}, K_{n2} + \Delta K_2) &\notin S_{D12}, \\ (K_{n1}, K_{n3} + \Delta K_3) &\notin S_{D13}, \\ (K_{n2} + \Delta K_2, K_{n3} + \Delta K_3) &\notin S_{D23}, \\ (K_{n2} + \Delta K_2, K_{n4}) &\notin S_{D24}, \\ (K_{n3} + \Delta K_3, K_{n4}) &\notin S_{D34}. \end{aligned} \quad (B.7)$$

Остаточно для маневру вибирається та пара курсів, для якої критерій оптимальності $Q_4^{(i,j)}$ приймає мінімальне значення.

Якщо ж звернення матриці ситуаційного обурення в нульову одночасною зміною курсів двох судів неможливо, то використовується маневр одночасної зміни курсів трьох суден, причому вибираються ті три курси, які впливають на компенсовані ситуаційні збурення. Очевидно, існує тільки один варіант таких курсів, до якого відносяться курси K_1 , K_2 і K_3 , індекси яких містяться в індексах, що компенсують ситуаційні збурення.

Звертаємо увагу, що ситуаційне збурення ω_{12} залежить від змін курсів K_1 і K_2 , а ситуаційне збурення ω_{13} - від змін курсів K_1 і K_3 . При перетворенні значень ω_{12} і ω_{13} в нульові слід вибирати значення змін курсів ΔK_1 , ΔK_2 і ΔK_3 , що зберігають нульові значення інших ситуаційних збурень ω_{14} , ω_{23} , ω_{24} і ω_{34} .

З урахуванням зазначеного умова $^{(2)}G_4^{(1,2,3)}$ перетворення матриці W_{b4} в нульову матрицю набирає вигляду:

$$\begin{aligned}
 Q_4^{(\Sigma)} &= (\Delta K_1^2 + \Delta K_2^2 + \Delta K_3^2) \rightarrow \min, \\
 (K_{n1} + \Delta K_1, K_{n2} + \Delta K_2) &\notin S_{D12}, \\
 (K_{n1} + \Delta K_1, K_{n3} + \Delta K_3) &\notin S_{D13}, \\
 (K_{n1} + \Delta K_1, K_{n4}) &\notin S_{D14}, \\
 (K_{n2} + \Delta K_2, K_{n3} + \Delta K_3) &\notin S_{D23}, \\
 (K_{n2} + \Delta K_2, K_{n4}) &\notin S_{D24}, \\
 (K_{n3} + \Delta K_3, K_{n4}) &\notin S_{D34}.
 \end{aligned} \tag{B.8}$$

Звернення матриці ситуаційного збурення в нульову матрицю зміною всіх чотирьох курсів недоцільно, тому що зміна курсу K_4 не впливає на ситуаційні збурення ω_{12} і ω_{13} , які слід компенсувати. Якщо ні одним з розглянутих маневрів неможливо перетворити матрицю W_{b4} в нульову, то слід зменшити гранично допустиму дистанцію найкоротшого зближення і зробити повторно пошук оптимального маневру компенсації ситуаційного збурення.

Для інших варіантів структури $St_4^{(2)}$ перетворення матриці W_{b4} в нульову матрицю проводиться аналогічним чином.

Розглянемо структуру $St_4^{(3)}$ матриці ситуаційного збурення, яка виникає, коли значення трьох ситуаційних збурень з шести рівні 1. Припустимо, реалізувався один з варіантів цієї структури, наприклад, $(\omega_{12} = \omega_{13} = \omega_{14} = 1, \omega_{23} = 0, \omega_{24} = \omega_{34} = 0)$. Якщо у всіх трьох ситуаційних збуреннях рівних 1 є однаковий індекс одного з курсів, то можлива компенсація всіх трьох збурень курсом з таким індексом. У нашому прикладі всі три ситуаційних збурення містять індекс 1, тому за допомогою курсу K_1 можна компенсувати всі три ситуаційних збурення. Якби необхідно було компенсувати ситуаційні збурення ω_{12} , ω_{23} і

ω_{34} , то одним курсом їх компенсація неможлива.

Повертаючись до наведеного прикладу, відзначимо, що умова $G_4^{(1)}$ компенсації ситуаційного збурення визначається виразом (6.20). У разі, якщо компенсація ситуаційного збурення курсом K_1 неможлива, то слід вибрати маневр зміни курсів двох суден. Аналіз наведеного варіанта структури $St_4^{(3)}$ показує, що компенсація можлива трьома парами курсів: (K_1, K_2) , (K_1, K_3) і (K_1, K_4) .

Якщо застосувати пару курсів (K_1, K_2) , то ситуаційне збурення ω_{12} залежить від обох курсів, а ситуаційні обурення ω_{13} і ω_{14} - від курсу K_1 . При цьому зміни курсів ΔK_1 і ΔK_2 повинні зберігати нульові значення ситуаційних збурень ω_{23} і ω_{24} .

Отже, умова $^{(3)}G_4^{(1,2)}$ перетворення матриці W_{b4} в нульову виражається формулою (6.21). Аналогічно при використанні пари курсів (K_1, K_3) умова $^{(3)}G_4^{(1,3)}$ визначається виразом (6.22).

У разі використання пари курсів (K_1, K_4) компенсація ситуаційних збурень із значенням 1 змінами курсів ΔK_1 і ΔK_4 повинна зберегти нульові значення збурень ω_{24} і ω_{34} , а умова перетворення $^{(3)}G_4^{(1,4)}$ матриці W_{b4} в нульову записується, як нижче показано, в наступному вигляді:

$$\begin{aligned}
 Q_4^{(1,4)} &= (\Delta K_1^2 + \Delta K_4^2) \rightarrow \min, \\
 (K_{n1} + \Delta K_1, K_{n2}) &\notin S_{D12}, \\
 (K_{n1} + \Delta K_1, K_{n3}) &\notin S_{D13}, \\
 (K_{n1} + \Delta K_1, K_{n4} + \Delta K_4) &\notin S_{D14}, \\
 (K_{n2}, K_{n4} + \Delta K_4) &\notin S_{D24}, \\
 (K_{n3}, K_{n4} + \Delta K_4) &\notin S_{D34}.
 \end{aligned}
 \tag{B.9}$$

Як і в попередніх випадках, для маневру вибирається та пара курсів, у якій значення критерію оптимальності $^{(3)}Q_4^{(i,j)}$ є мінімальним. Якщо компенсація ситуаційного обурення зміною двох курсів виявилася неможливою, то слід використовувати маневр одночасної зміни курсів трьох суден. У розглянутому прикладі існує чотири варіанти такого маневру зміною курсу, а саме (K_1, K_2, K_3) , (K_1, K_2, K_4) , (K_1, K_3, K_4) і (K_2, K_3, K_4) .

У разі застосування варіанту маневру (K_1, K_2, K_3) ситуаційне збурення ω_{12} компенсується курсами K_1 і K_2 , обурення ω_{13} - курсами K_1 і K_2 , а збурення ω_{14} - тільки курсом K_1 . При цьому необхідно, щоб зміни курсів ΔK_1 , ΔK_2 і ΔK_3 , зберегли нульові значення ситуаційних збурень ω_{23} , ω_{24} і ω_{34} . Тому умова $G_4^{(1,2,3)}$ виражається співвідношенням (В.8). При маневрі курсами (K_1, K_2, K_4) збурення ω_{12} компенсується курсами K_1 і K_2 , збурення ω_{13} - курсом K_1 , а збурення ω_{14} - курсами K_1 і K_4 .

У цьому випадку умова $^{(3)}G_4^{(1,2,4)}$ звернення матриці W_{b4} в нульову матрицю набирає вигляду:

$$\begin{aligned}
 Q_4^{(\Sigma 1)} &= (\Delta K_1^2 + \Delta K_2^2 + \Delta K_4^2) \rightarrow \min \\
 (K_{n1} + \Delta K_1, K_{n2} + \Delta K_2) &\notin S_{D12}, \\
 (K_{n1} + \Delta K_1, K_{n3}) &\notin S_{D13}, \\
 (K_{n1} + \Delta K_1, K_{n4} + \Delta K_4) &\notin S_{D14}, \\
 (K_{n2} + \Delta K_2, K_{n3}) &\notin S_{D23}, \\
 (K_{n2} + \Delta K_2, K_{n4} + \Delta K_4) &\notin S_{D24}, \\
 (K_{n3}, K_{n4} + \Delta K_4) &\notin S_{D34}.
 \end{aligned}
 \tag{B.10}$$

Якщо в якості маневру обрані зміни курсів (K_1, K_3, K_4) , то розмірковуючи аналогічно, отримаємо умову $^{(3)}G_4^{(1,3,4)}$ перетворення матриці W_{b4} в нульову матрицю:

$$\begin{aligned}
Q_4^{(\Sigma 2)} &= (\Delta K_1^2 + \Delta K_3^2 + \Delta K_4^2) \rightarrow \min \\
(K_{n1} + \Delta K_1, K_{n2}) &\notin S_{D12}, \\
(K_{n1} + \Delta K_1, K_{n3} + \Delta K_3) &\notin S_{D13}, \\
(K_{n1} + \Delta K_1, K_{n4} + \Delta K_4) &\notin S_{D14}, \\
(K_{n2}, K_{n3} + \Delta K_3) &\notin S_{D23}, \\
(K_{n2}, K_{n4} + \Delta K_4) &\notin S_{D24}, \\
(K_{n3} + \Delta K_3, K_{n4} + \Delta K_4) &\notin S_{D34}.
\end{aligned} \tag{B.11}$$

Розглянемо заключний варіант маневру зміною курсів трьох суден (K_2 , K_3 , K_4) на величини ΔK_2 , ΔK_3 і ΔK_4 . Умова ${}^{(3)}G_4^{(2,3,4)}$ перетворення матриці в нульову матрицю W_{b4} в цьому випадку має такий вигляд:

$$\begin{aligned}
Q_4^{(\Sigma 3)} &= (\Delta K_2^2 + \Delta K_3^2 + \Delta K_4^2) \rightarrow \min \\
(K_{n1}, K_{n2} + \Delta K_2) &\notin S_{D12}, \\
(K_{n1}, K_{n3} + \Delta K_3) &\notin S_{D13}, \\
(K_{n1}, K_{n4} + \Delta K_4) &\notin S_{D14}, \\
(K_{n2} + \Delta K_2, K_{n3} + \Delta K_3) &\notin S_{D23}, \\
(K_{n2} + \Delta K_2, K_{n4} + \Delta K_4) &\notin S_{D24}, \\
(K_{n3} + \Delta K_3, K_{n4} + \Delta K_4) &\notin S_{D34}.
\end{aligned} \tag{B.12}$$

З розглянутих чотирьох варіантів маневру зміною курсів трьох суден вибираємо той, при якому досягається мінімум критерію оптимальності $Q_4^{(\Sigma i)}$.

Якщо компенсувати ситуаційне збурення маневром зміни трьох курсів неможливо, то застосовується маневр зміни курсів усіх чотирьох суден. При цьому ситуаційне збурення ω_{12} компенсується курсами K_1 і K_2 , збурення ω_{13} - курсами K_1 і K_3 , а збурення ω_{14} - тільки курсами K_1 і K_4 . При цьому

необхідно, щоб зміни курсів ΔK_1 , ΔK_2 , ΔK_3 і ΔK_4 зберегли нульові значення ситуаційних збурень ω_{23} , ω_{24} і ω_{34} . Умова $^{(3)}G_4^{(1,2,3,4)}$ перетворення матриці W_{b4} в нульову матрицю в цьому випадку має такий вигляд:

$$\begin{aligned}
 Q_4^{(\Sigma)} &= (\Delta K_1^2 + \Delta K_2^2 + \Delta K_3^2 + \Delta K_4^2) \rightarrow \min \\
 (K_{n1} + \Delta K_1, K_{n2} + \Delta K_2) &\notin S_{D12}, \\
 (K_{n1} + \Delta K_1, K_{n3} + \Delta K_3) &\notin S_{D13}, \\
 (K_{n1} + \Delta K_1, K_{n4} + \Delta K_4) &\notin S_{D14}, \\
 (K_{n2} + \Delta K_2, K_{n3} + \Delta K_3) &\notin S_{D23}, \\
 (K_{n2} + \Delta K_2, K_{n4} + \Delta K_4) &\notin S_{D24}, \\
 (K_{n3} + \Delta K_3, K_{n4} + \Delta K_4) &\notin S_{D34}.
 \end{aligned} \tag{B.13}$$

Якщо перетворення матриці ситуаційного збурення W_{b4} в нульову матрицю маневром зміни курсів усіх суден неможливо слід зменшити гранично допустиму дистанцію найкоротшого зближення і знову виконати пошук значення оптимального вектору керування.

Аналогічно знаходиться оптимальний вектор управління для інших варіантів структури $St_4^{(3)}$.

Структура $St_4^{(4)}$ матриці W_{b4} виникає, коли значення чотирьох ситуаційних збурень з шести рівні 1. В якості прикладу розглянемо один з можливих варіантів даної структури ($\omega_{12} = \omega_{13} = \omega_{14} = \omega_{23} = 1$, $\omega_{24} = \omega_{34} = 0$).

Так як всі чотири ситуаційних збурення не містять однаковий індекс одного з курсів, то перетворення матриці W_{b4} в нульову матрицю зміною тільки одного з курсів (з чотирьох) неможливо. Тому розглянемо можливість використовувати для цієї цілі спільну зміну двох курсів. Так як зміна всіх чотирьох ситуаційних збурень, рівних 1, відбувається при використанні пари курсів (K_1, K_2) і (K_1, K_3) , то розглянемо умови перетворення матриці W_{b4} в

нульову матрицю при зміні цих пар курсів.

При зміні курсів K_1 і K_2 на величини ΔK_1 і ΔK_2 і компенсації ненульових ω_{ij} , ситуаційне збурення ω_{24} повинні зберігати ненульові значення. Умова

ва $^{(4)}G_4^{(1,2)}$ має вигляд:

$$\begin{aligned} Q_4^{(1,2)} &= (\Delta K_1^2 + \Delta K_2^2) \rightarrow \min, \\ (K_{n1} + \Delta K_1, K_{n2} + \Delta K_2) &\notin S_{D12}, \\ (K_{n1} + \Delta K_1, K_{n3}) &\notin S_{D13}, \\ (K_{n1} + \Delta K_1, K_{n4}) &\notin S_{D14}, \\ (K_{n2} + \Delta K_2, K_{n3}) &\notin S_{D23}, \\ (K_{n2} + \Delta K_2, K_{n4}) &\notin S_{D24}. \end{aligned} \quad (B.14)$$

У разі, коли використовуються зміни курсів K_1 і K_3 на величини ΔK_1 і ΔK_3 при компенсації ситуаційних збурень ω_{ij} , значення яких дорівнює 1, ситуаційне збурення ω_{34} повинно зберігати нульове значення. Отже, умова $^{(4)}G_4^{(1,3)}$ перетворення матриці W_{b4} в нульову матрицю формалізується наступним чином:

$$\begin{aligned} Q_4^{(1,3)} &= (\Delta K_1^2 + \Delta K_3^2) \rightarrow \min, \\ (K_{n1} + \Delta K_1, K_{n2}) &\notin S_{D12}, \\ (K_{n1} + \Delta K_1, K_{n3} + \Delta K_3) &\notin S_{D13}, \\ (K_{n1} + \Delta K_1, K_{n4}) &\notin S_{D14}, \\ (K_{n2}, K_{n3} + \Delta K_3) &\notin S_{D23}, \\ (K_{n3} + \Delta K_3, K_{n4}) &\notin S_{D34}. \end{aligned} \quad (B.15)$$

Якщо обидва манера зміною двох курсів можливі, то вибирається той маневр, критерій оптимальності якого менший. У разі, коли зазначені манев-

ри неможливі, слід зробити маневр одночасної зміни курсів трьох суден. При цьому можливі 4 варіанти такого маневру курсами, індекси яких є в індексах ситуаційних збурень зі значеннями 1. Такими маневрами є (K_1, K_2, K_3) , (K_1, K_2, K_4) , (K_1, K_3, K_4) и (K_2, K_3, K_4) .

У разі використання маневру (K_1, K_2, K_3) ситуаційне збурення ω_{12} компенсується зміною курсів K_1 і K_2 , ситуаційне збурення ω_{13} - курсами K_1 і K_3 , ситуаційне збурення ω_{14} - курсом K_1 і ситуаційне збурення ω_{23} - курсами K_2 і K_3 . При цьому зміни курсів ΔK_1 , ΔK_2 і ΔK_3 не повинні змінити нульові значення ситуаційних збурень ω_{24} і ω_{34} . Тому умова ${}^{(4)}G_4^{(1,2,3)}$ перетворення матриці W_{b4} в нульову матрицю має вигляд:

$$\begin{aligned}
 Q_4^{(\Sigma 1)} &= (\Delta K_1^2 + \Delta K_2^2 + \Delta K_3^2) \rightarrow \min \\
 (K_{n1} + \Delta K_1, K_{n2} + \Delta K_2) &\notin S_{D12}, \\
 (K_{n1} + \Delta K_1, K_{n3} + \Delta K_3) &\notin S_{D13}, \\
 (K_{n1} + \Delta K_1, K_{n4}) &\notin S_{D14}, \\
 (K_{n2} + \Delta K_2, K_{n3} + \Delta K_3) &\notin S_{D23}, \\
 (K_{n2} + \Delta K_2, K_{n4}) &\notin S_{D24}, \\
 (K_{n3} + \Delta K_3, K_{n4}) &\notin S_{D34}.
 \end{aligned} \tag{B.16}$$

У разі використання маневру (K_1, K_2, K_4) , умова ${}^{(4)}G_4^{(1,2,4)}$ перетворення матриці W_{b4} в нульову матрицю виражається наступним чином:

$$\begin{aligned}
 Q_4^{(\Sigma 2)} &= (\Delta K_1^2 + \Delta K_2^2 + \Delta K_4^2) \rightarrow \min \\
 (K_{n1} + \Delta K_1, K_{n2} + \Delta K_2) &\notin S_{D12}, \\
 (K_{n1} + \Delta K_1, K_{n3}) &\notin S_{D13}, \\
 (K_{n1} + \Delta K_1, K_{n4} + \Delta K_4) &\notin S_{D14}, \\
 (K_{n2} + \Delta K_2, K_{n3}) &\notin S_{D23},
 \end{aligned} \tag{B.17}$$

$$\begin{aligned}(K_{n2} + \Delta K_2, K_{n4} + \Delta K_4) &\notin S_{D24}, \\ (K_{n3}, K_{n4} + \Delta K_4) &\notin S_{D34}.\end{aligned}$$

Якщо використовувати маневр (K_1, K_3, K_4) , то умова ${}^{(4)}G_4^{(1,3,4)}$ перетворення матриці W_{b4} в нульову матрицю має наступний вигляд:

$$\begin{aligned}Q_4^{(\Sigma 3)} &= (\Delta K_1^2 + \Delta K_3^2 + \Delta K_4^2) \rightarrow \min \\ (K_{n1} + \Delta K_1, K_{n2}) &\notin S_{D12}, \\ (K_{n1} + \Delta K_1, K_{n3} + \Delta K_3) &\notin S_{D13}, \\ (K_{n1} + \Delta K_1, K_{n4} + \Delta K_4) &\notin S_{D14}, \\ (K_{n2}, K_{n3} + \Delta K_3) &\notin S_{D23}, \\ (K_{n2}, K_{n4} + \Delta K_4) &\notin S_{D24}, \\ (K_{n3} + \Delta K_3, K_{n4} + \Delta K_4) &\notin S_{D34}.\end{aligned}\tag{B.18}$$

При використанні заключного маневру (K_2, K_3, K_4) реалізується умова ${}^{(4)}G_4^{(2,3,4)}$ перетворення матриці W_{b4} в нульову матрицю:

$$\begin{aligned}Q_4^{(\Sigma 4)} &= (\Delta K_2^2 + \Delta K_3^2 + \Delta K_4^2) \rightarrow \min \\ (K_{n1}, K_{n2} + \Delta K_2) &\notin S_{D12}, \\ (K_{n1}, K_{n3} + \Delta K_3) &\notin S_{D13}, \\ (K_{n1}, K_{n4} + \Delta K_4) &\notin S_{D14}, \\ (K_{n2} + \Delta K_2, K_{n3} + \Delta K_3) &\notin S_{D23}, \\ (K_{n2} + \Delta K_2, K_{n4} + \Delta K_4) &\notin S_{D24}, \\ (K_{n3} + \Delta K_3, K_{n4} + \Delta K_4) &\notin S_{D34}.\end{aligned}\tag{B.19}$$

З чотирьох розглянутих маневрів оптимальним є маневр з мінімальним

значенням критерію оптимальності $Q_4^{(\Sigma)}$. У разі, якщо ситуаційні збурення розглянутими маневрами компенсувати неможливо, то використовується маневр зміною курсів усіх чотирьох суден з умовою ${}^{(4)}G_4^{(1,2,3,4)}$ перетворення матриці W_{b4} в нульову матрицю:

$$\begin{aligned}
 Q_4^{(\Sigma)} &= (\Delta K_1^2 + \Delta K_2^2 + \Delta K_3^2 + \Delta K_4^2) \rightarrow \min \\
 (K_{n1} + \Delta K_1, K_{n2} + \Delta K_2) &\notin S_{D12}, \\
 (K_{n1} + \Delta K_1, K_{n3} + \Delta K_3) &\notin S_{D13}, \\
 (K_{n1} + \Delta K_1, K_{n4} + \Delta K_4) &\notin S_{D14}, \\
 (K_{n2} + \Delta K_2, K_{n3} + \Delta K_3) &\notin S_{D23}, \\
 (K_{n2} + \Delta K_2, K_{n4} + \Delta K_4) &\notin S_{D24}, \\
 (K_{n3} + \Delta K_3, K_{n4} + \Delta K_4) &\notin S_{D34}.
 \end{aligned} \tag{B.20}$$

При неможливості перетворення матриці W_{b4} в нульову матрицю за допомогою розглянутого маневру слід зменшити значення гранично допустимої дистанції і повторити визначення оптимального маневру за описаним алгоритмом.

У разі реалізації структури $St_4^{(5)}$ матриці W_{b4} п'ять з шести ситуаційних збурень мають значення рівне 1. Як приклад розглянемо один з варіантів цієї структури ($\omega_{12} = \omega_{13} = \omega_{14} = \omega_{23} = \omega_{24} = 1$, $\omega_{34} = 0$). Очевидно, перетворення матриці W_{b4} в нульову матрицю зміною тільки одного з курсів неможливо. Однак це можливо при зміні двох курсів (K_1 , K_2). При цьому умова ${}^{(5)}G_4^{(1,2)}$ збігається з умовою ${}^{(4)}G_4^{(1,2)}$ і визначається виразом (B.14).

При використанні маневру зміни трьох курсів можливі ті ж варіанти, що і при структурі $St_4^{(4)}$, тобто (K_1 , K_2 , K_3), (K_1 , K_2 , K_4), (K_1 , K_3 , K_4) і (K_2 , K_3 , K_4). Причому умови перетворення матриці W_{b4} в нульову матрицю в

даному випадку $^{(5)}G_4^{(1,2,3)}$, $^{(5)}G_4^{(1,2,4)}$, $^{(5)}G_4^{(1,3,4)}$ і $^{(5)}G_4^{(2,3,4)}$ збігається з відповідними умовами структури $St_4^{(4)}$ $^{(4)}G_4^{(1,2,3)}$, $^{(4)}G_4^{(1,2,4)}$, $^{(4)}G_4^{(1,3,4)}$, $^{(4)}G_4^{(2,3,4)}$ і визначаються відповідними виразами (B.16) - (B.19).

У разі необхідності використання маневру зміною курсів усіх чотирьох суден умова $^{(5)}G_4^{(1,2,3,4)}$ перетворення матриці W_{b4} в нульову матрицю збігається з умовою $^{(4)}G_4^{(1,2,3,4)}$ і визначається виразом (B.20).

Якщо всі шість ситуаційних збурень рівні 1, то реалізуються структура $St_4^{(6)}$, причому перетворення матриці W_{b4} в нульову матрицю можливо тільки використовуючи варіанти зміни трьох або чотирьох курсів суден. Причому маневри такі ж, як і при структурі $St_4^{(5)}$, а умови $^{(6)}G_4^{(1,2,3)}$, $^{(6)}G_4^{(1,2,4)}$, $^{(6)}G_4^{(1,3,4)}$, $^{(6)}G_4^{(2,3,4)}$ і $^{(6)}G_4^{(1,2,3,4)}$ перетворення матриці W_{b4} в нульову матрицю визначаються виразами (B.16) - (B.20). Пошук оптимального маневру проводиться аналогічно вищевикладеному алгоритму. Якщо число взаємодіючих суден в групі більше чотирьох, то спосіб перетворення матриці W_{bi} ситуаційного збурення в нульову матрицю будується на розглянутій раніше процедурі при числі суден в групі до чотирьох.

В.3. Графічний спосіб вибору оптимального маневру розходження групи із п'яти суден комп'ютерним моделюванням

Для ускладнення вибору безпечних курсів розходження змінюємо початкову ситуацію зближення, зменшуючи курс п'ятого судна до 135° , що веде до виникнення ситуаційного збурення між п'ятим і третім суднами (рис. В.8), що впливає з індикатора небезпеки.

Після використання клавіші «Матриця» виводяться клавіші матриці ситуаційного збурення, як показано на рис. В.9. Аналіз матриці ситуаційного

збурення показує, що друге і п'яте судна, як і четверте судно з п'ятим, зближуються безпечно, інші зближення кожної пари суден є небезпечними, тобто виникають ситуаційні збурення. Для компенсації ситуаційного збурення достатньо зміни курсів трьох суден, причому найбільш ефективною є зміна курсу першого судна. Тому за допомогою клавіші «12» на екран монітора виводиться розширена площина курсів і область небезпечних курсів першого і другого суден, які показані на рис. В.10. Збільшуючи курс першого судна до 132° , проводиться компенсація ситуаційних збурень ω_{13} , ω_{14} та ω_{15} .

Ухилення другого судна вліво на курс 156° веде до компенсації ситуаційних збурень ω_{12} , ω_{23} та ω_{24} , як видно з рис. В.11. Залишилися некомпенсованими ситуаційні збурення, пов'язані з третім судном, тобто ω_{34} та ω_{35} , тому слід спочатку використовувати клавішу «Матриця» (рис. В.12) і використовувати клавішу «34» для отримання можливості зміни курсу третього судна.

В результаті цього виводиться область небезпечних курсів третього і четвертого суден. Використовуючи клавішу «К3», за допомогою лінійки прокрутки змінюємо курс К3 третього судна на 37° вправо, в результаті чого ситуаційні збурення ω_{34} та ω_{35} звертаються в нуль і матриця ситуаційного збурення стає нульовою, що впливає з індикатора безпеки (рис. В.13).

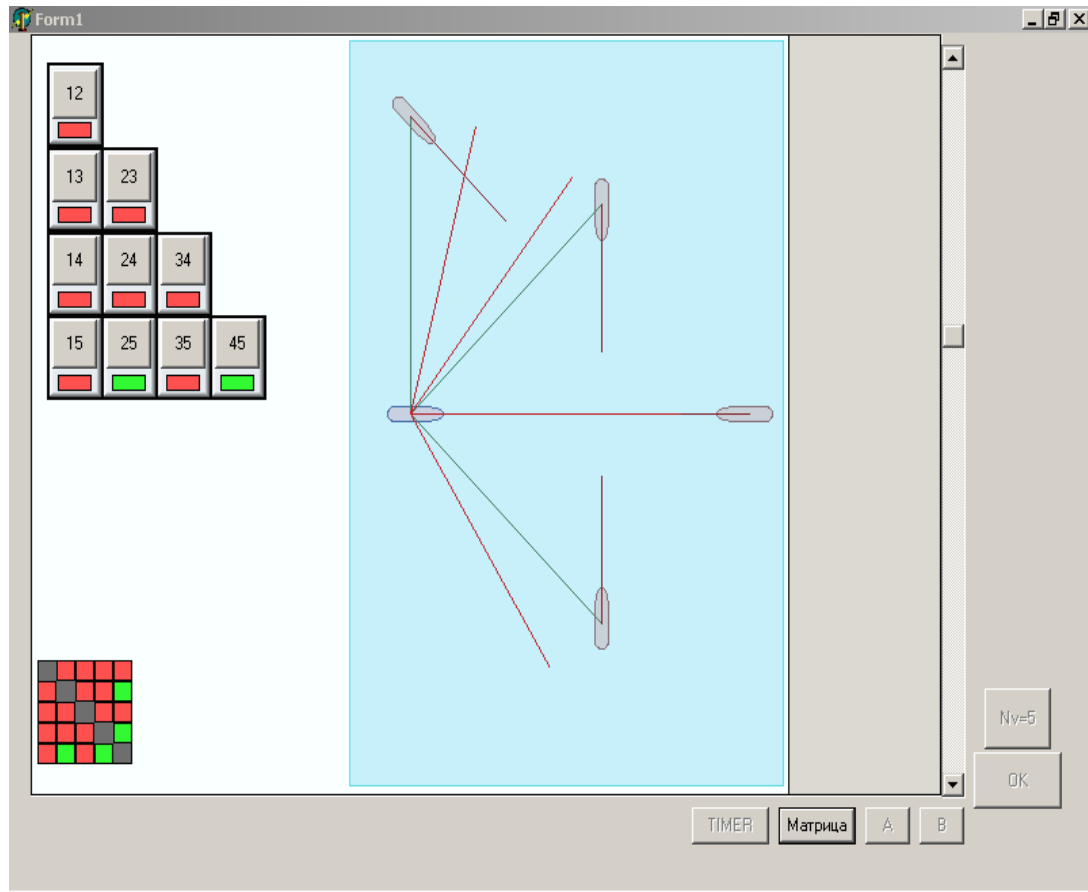


Рис. В.8. Зміна початкової ситуації зближення суден

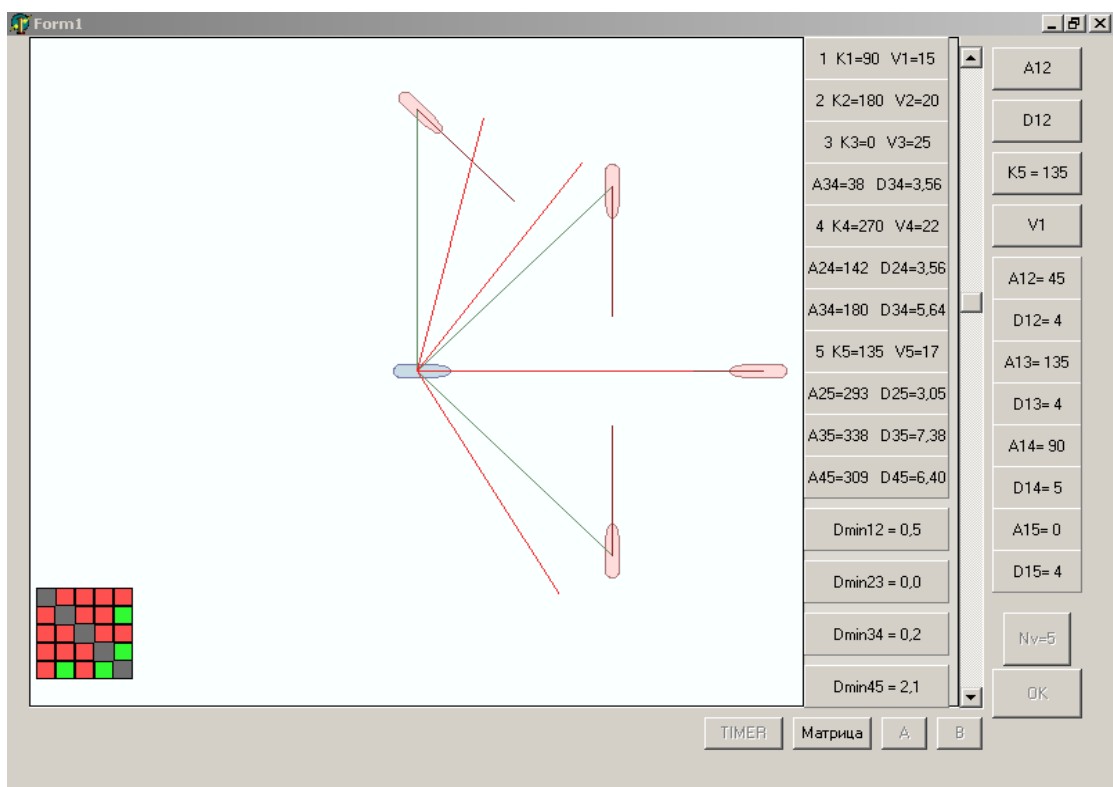


Рис. В.9. Виведення клавіш матриці ситуаційного збурення

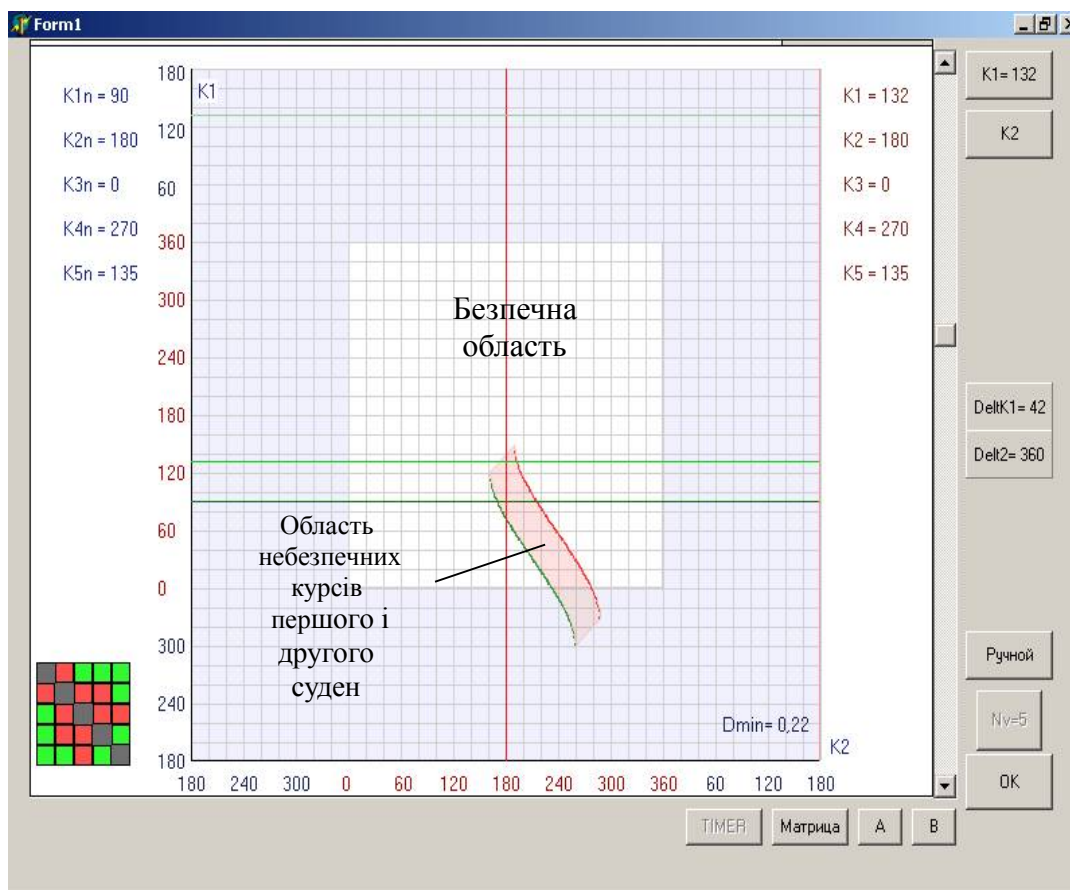


Рис. В.10. Область небезпечних курсів першого і другого суден

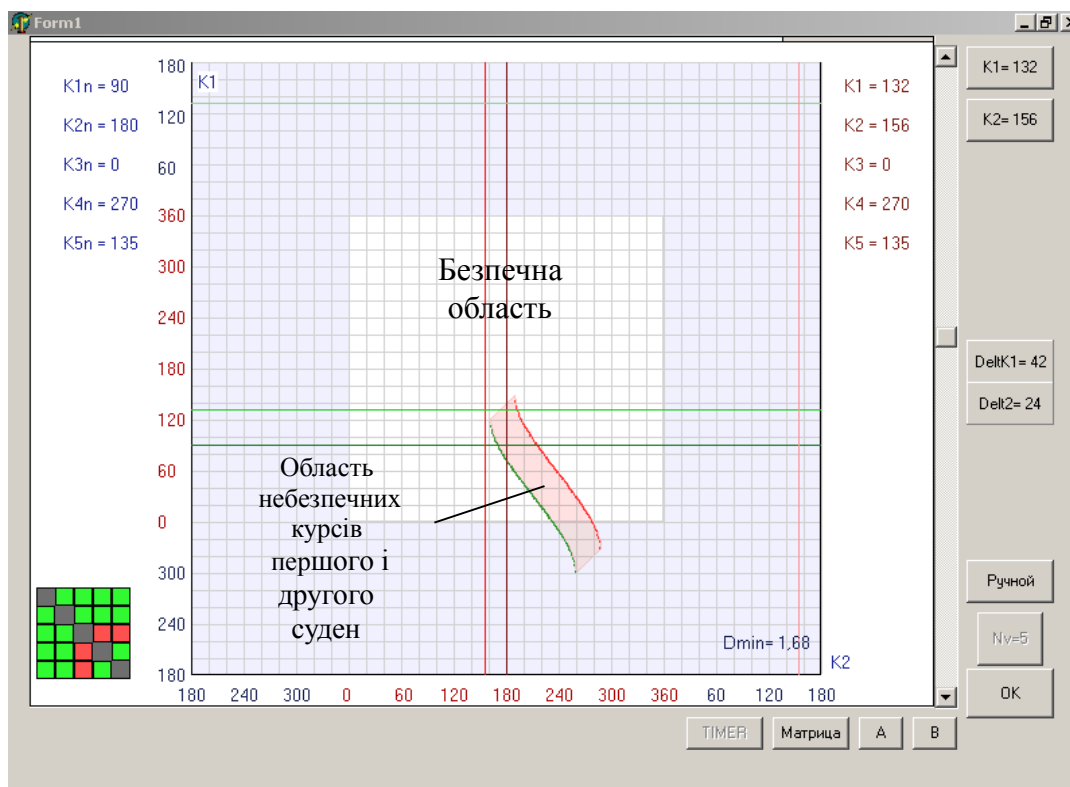


Рис. В.11. Вибір безпечного курсу K2 другого судна

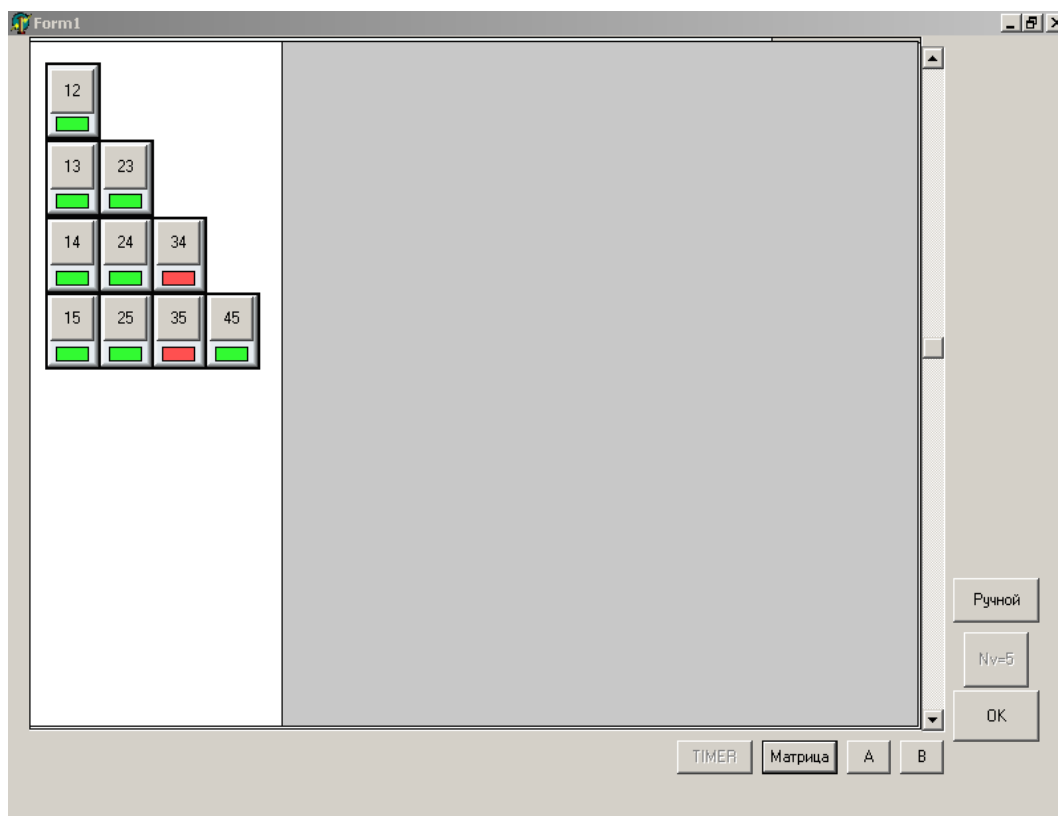


Рис. В.12. Виведення клавіш матриці ситуаційного збурення

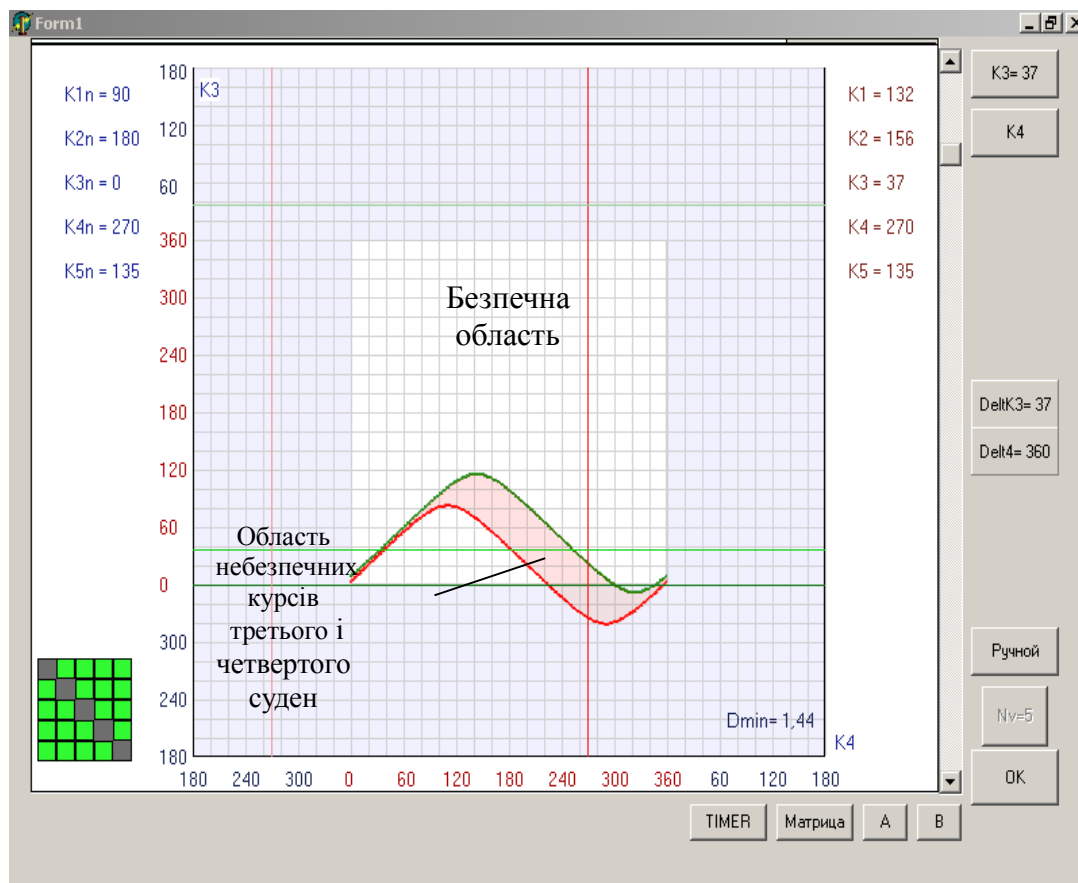


Рис. В.13. Вибір безпечного курсу K3 третього судна

В.4. Графічний спосіб вибору оптимального маневру розходження групи з трьох і чотирьох суден комп'ютерним моделюванням

Для вибору ситуації зближення трьох суден необхідно встановити клавішею «Nv=» значення 3, при цьому на екрані монітора відображається початкова ситуація зближення, показана на рис. В.14. Індикатор небезпеки показує, що небезпечно зближуються друге і третє судно, для кожного з яких виникає ситуаційне збурення, про що свідчить колір відповідних секторів індикатора.

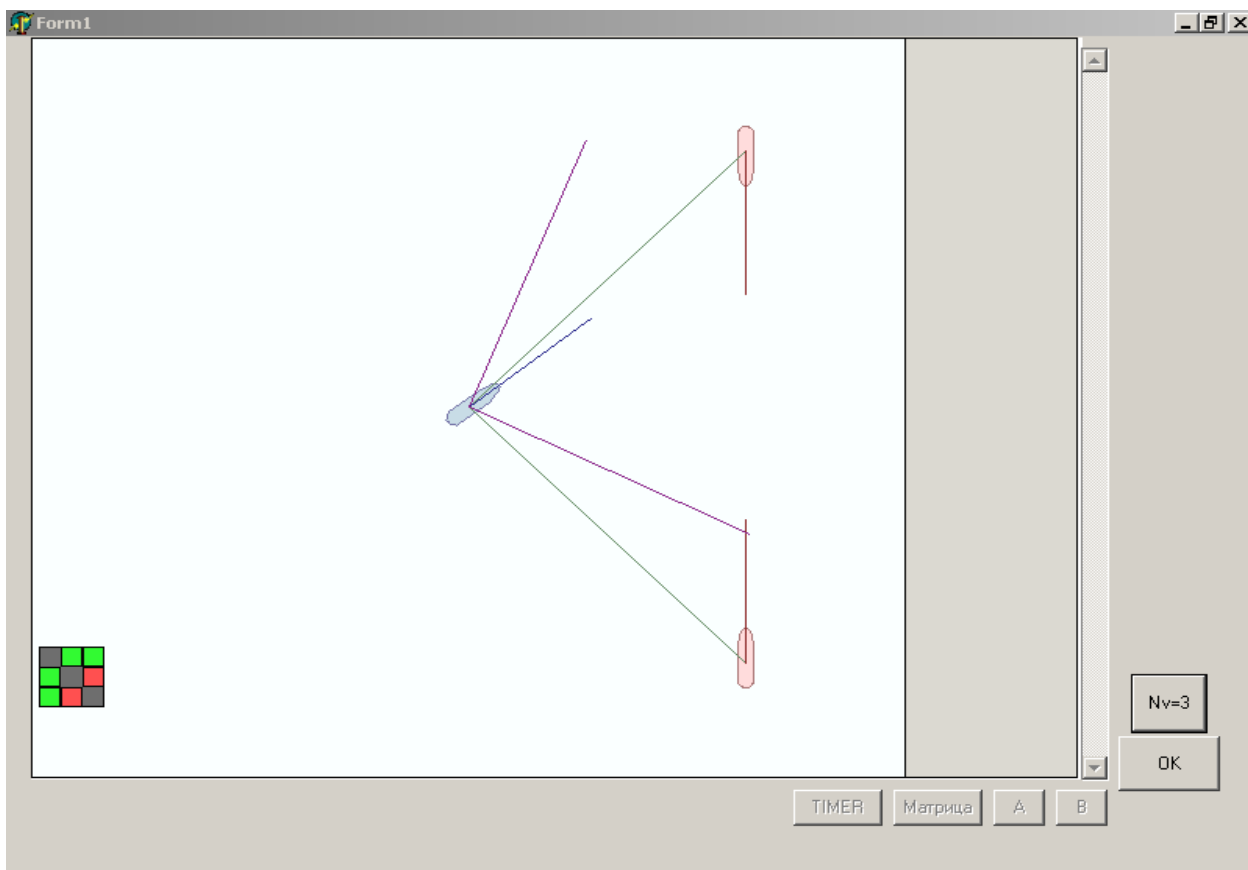
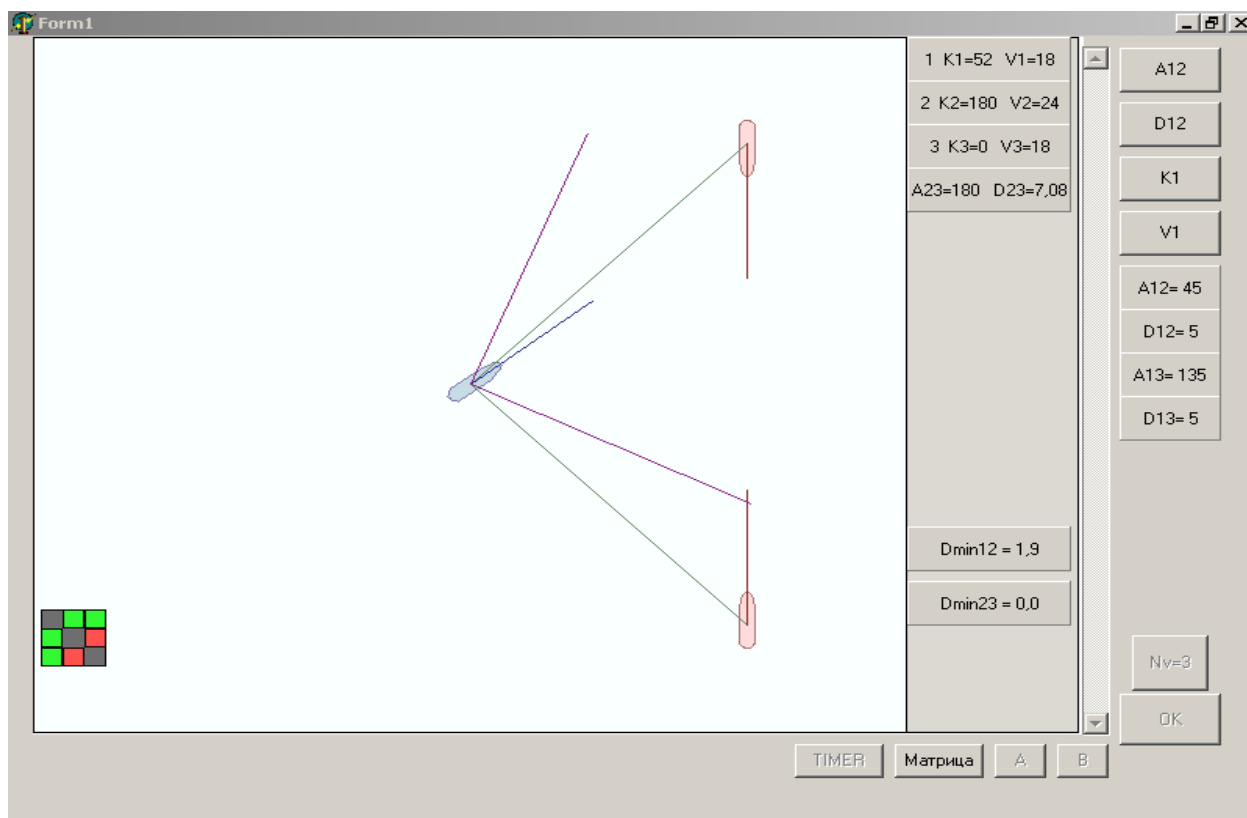


Рис. В.14. Початкова ситуація зближення трьох суден

Для подальшої роботи слід використовувати клавішу «OK», в результаті чого з'являються клавіші і панелі для зміни і індикації значень параметрі початкової ситуації (рис. В.15).



В.15. Параметри початкової ситуації

Після використання кнопки «Матриця» виводяться клавіші, що характеризують стан ситуаційної матриці, як показано на рис. В.16. При цьому на кожній клавіші з'являється індикатор про ситуаційне збурення кожної пари суден. Він забарвлений в червоний колір при наявності ситуаційного збурення і в зелений колір - при його відсутності. Якщо судна віддаляються, то індикатори фарбуються в білий колір.

Так як ситуаційне збурення існує тільки між другим і третім суднами, то для його компенсації слід змінити курси одного і / або другого судна. Тому слід розглянути розширену площину і небезпечну область курсів другого і третього суден.

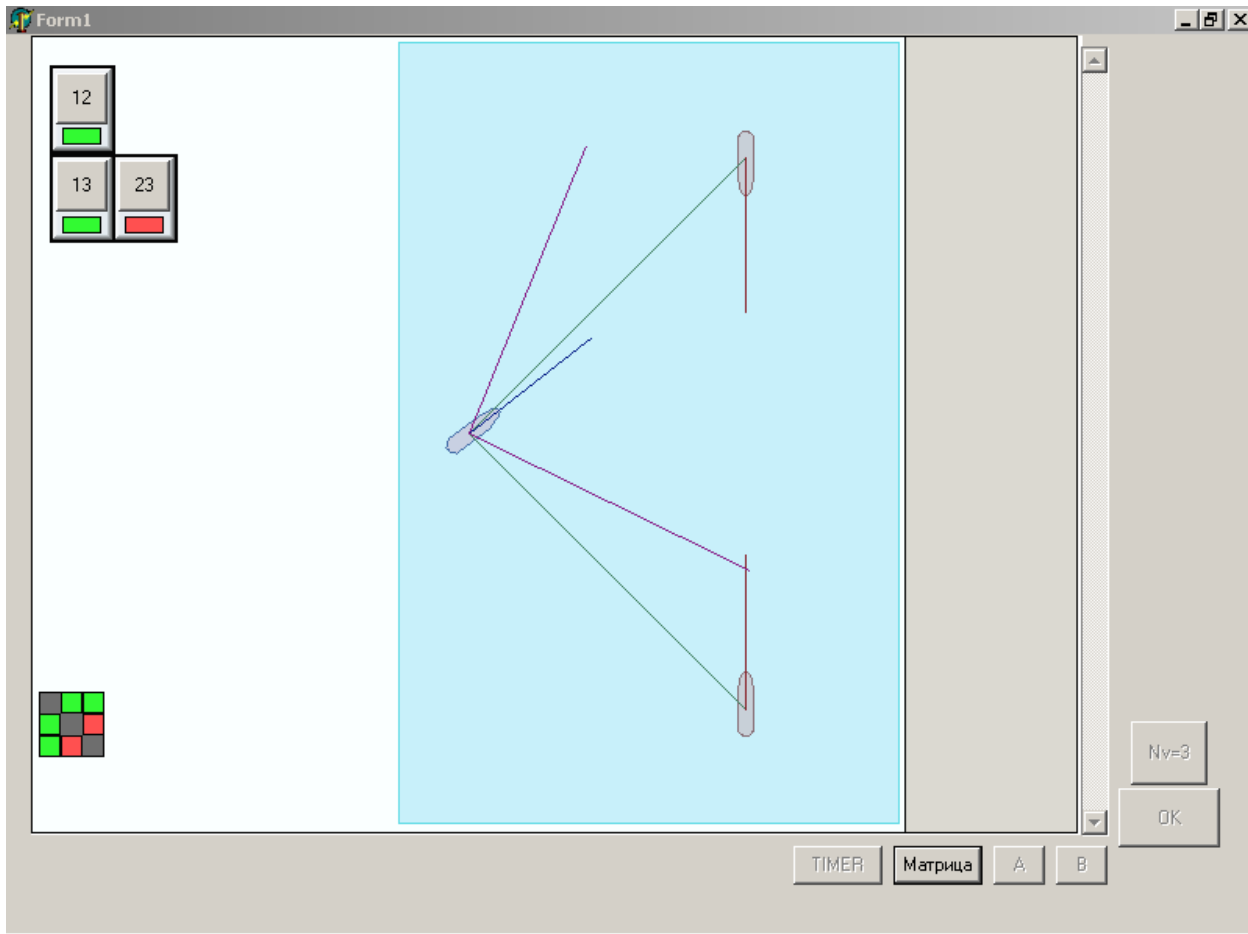
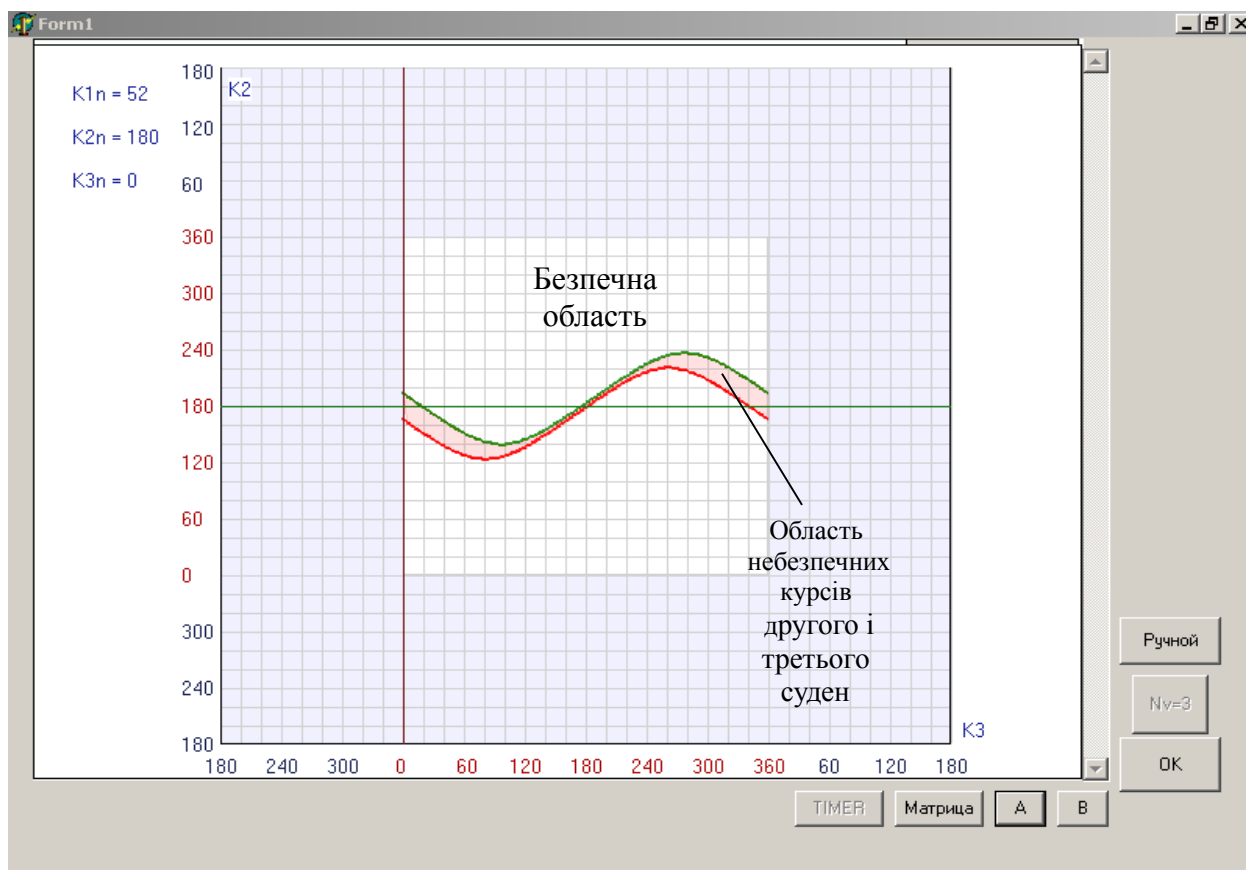


Рис. В.16. Поява клавiш матриці ситуаційного збурення

З цією метою слід використовувати клавiшу «А», і на екрані монітора відображається розширена площа і небезпечна область курсів другого і третього суден. Звертаємо увагу на те, що значення курсу К2 другого судна відображаються по вертикальній осі, а третього судна - по горизонтальній, як показано на рис. В.17.

У ситуаціях зближення більше двох суден при виведенні розширеної площини і небезпечної області курсів обраної пари суден проводиться індикація початкових значень курсів всіх суден ситуації. В даному випадку в лівій частині екрана виводяться початкові курси всіх трьох суден.

Звертаємо увагу на те, що лінії початкових курсів обох суден перетинаються в небезпечній області, що підтверджує наявність ситуаційного збурення.



В.17. Область небезпечних курсів другого і третього суден

Використовуємо клавішу «OK» для можливості вибору безпечного курсу ухилення. При цьому в правій частині екрана відображаються значення поточних курсів всіх трьох суден. У правій частині екрана з'являються клавіші «K2 =>» і «K3 =>» для вибору курсу ухилення, причому відбувається ініціалізація лінійки прокрутки, за допомогою якої проводиться вибір значення обраного курсу (рис. В.18). Також з'являються інформаційні панелі для виведення величини змін курсів обраної пари суден.

Попередній аналіз показав, що більш доцільним є зміна курсу другим судном, тому що вимагає меншого відхилення від програмного курсу. Якщо судно буде ухилятися вправо, то при виведенні курсу з небезпечної області з'являється ситуаційної збурення з першим судном, тому слід проводити зміну курсу судна вліво, хоча це пов'язано з великим відхиленням від його програмного значення.

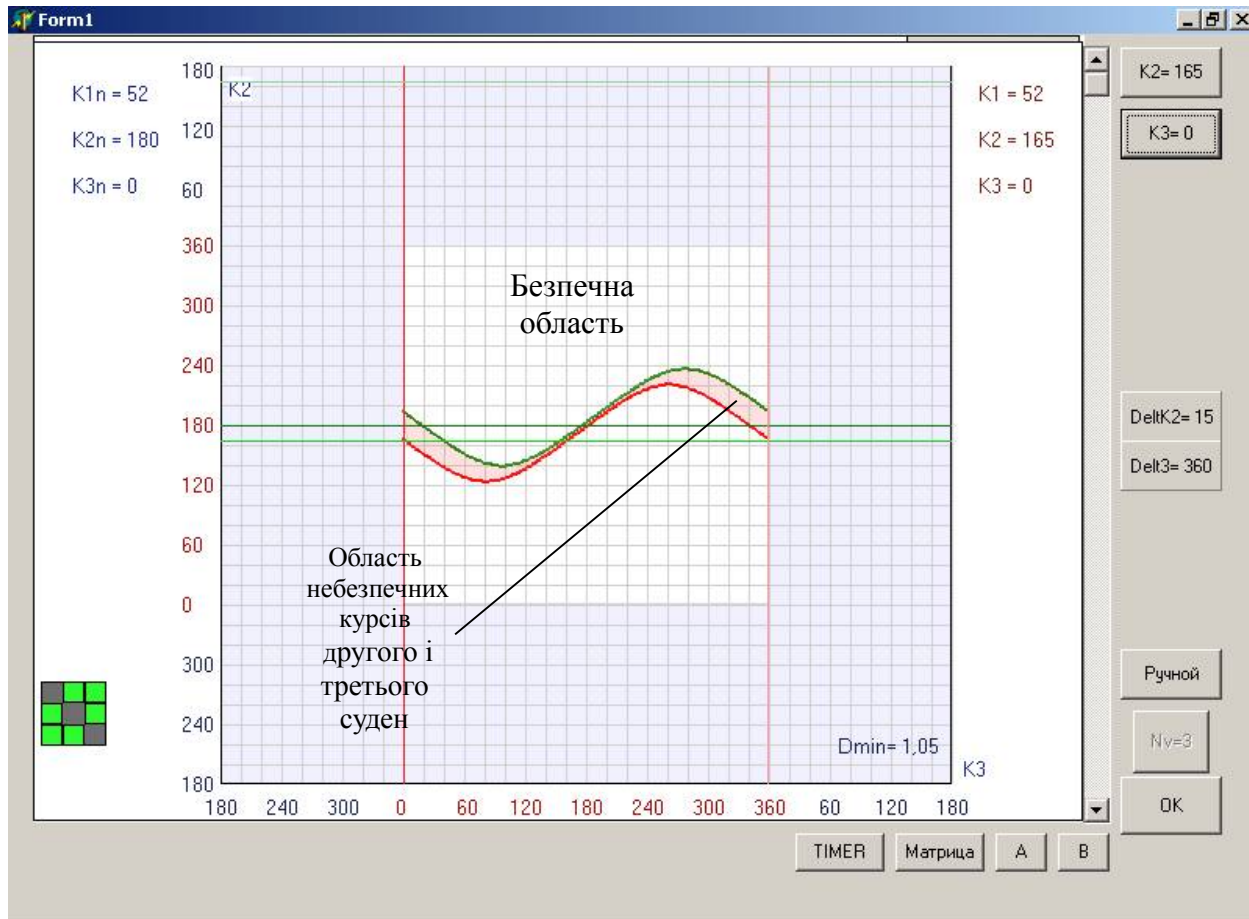


Рис. В.18. Вибір безпечного курсу ухилення другим судном

На рис. В.18 показано, що безпечне розходження суден на дистанції 1,05 милі відбувається при ухиленні другого судна на 15° вліво, тобто на курс 165° .

Для вибору ситуації зближення чотирьох суден клавішу «Nv» необхідно «клікнути» чотири рази, в результаті чого на екрані монітора відображається початкова ситуація зближення чотирьох суден. Згідно з індикатором небезпеки зближення кожної пари суден є небезпечним - всі сектори червоного кольору (рис. В.19).

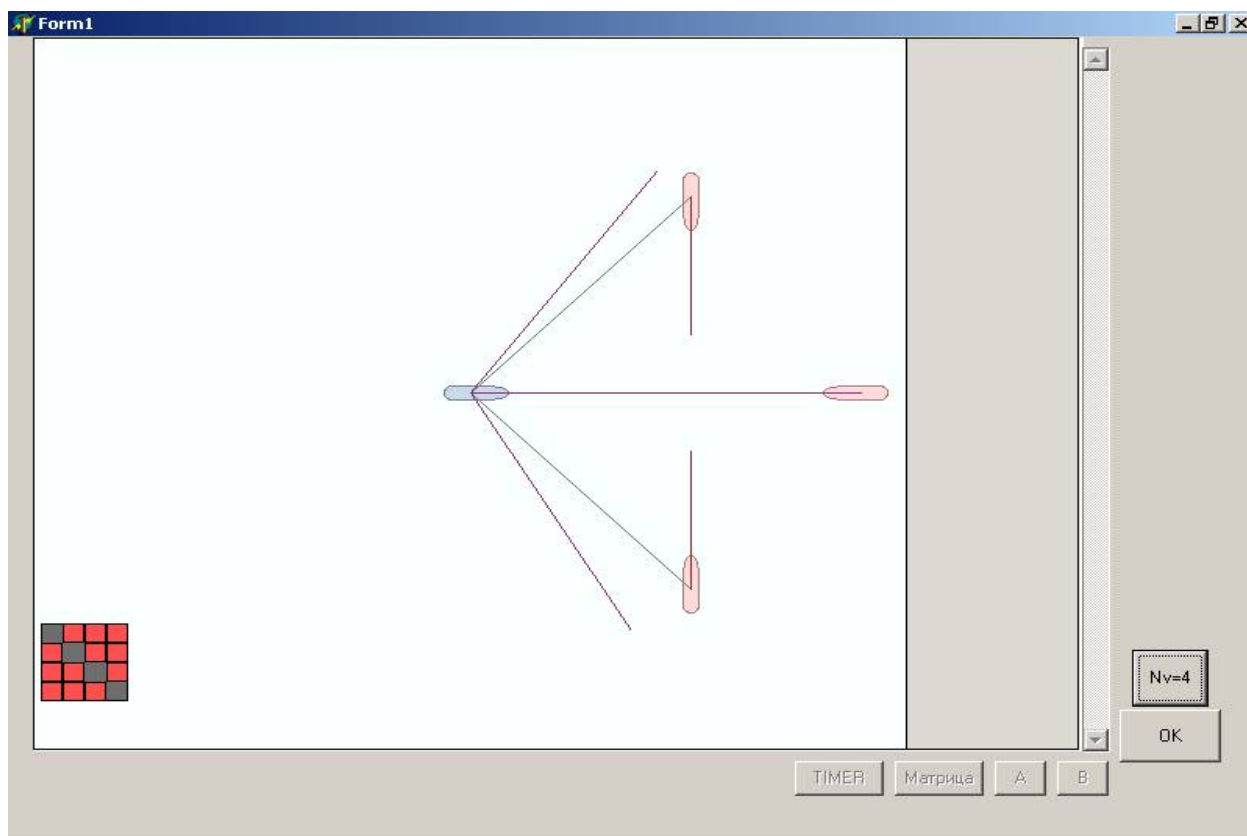


Рис. В.19. Початкова ситуація зближення чотирьох суден

Після використання клавіші «ОК», як показано на рис. В.20, індукує параметри початкової ситуації, і з'являється можливість її зміни.

В результаті «клацання» клавіші «Матриця», що активізувалася, виводяться шість клавіш, що характеризують стан матриці ситуаційного збурення, тобто наявності небезпеки парних зближень всієї групи суден. Індикатори небезпеки всіх клавіш пофарбовані в червоний колір, як показано на рис. В.21.

Аналіз початкової ситуації зближення суден показує, що для перетворення матриці ситуаційного збурення в нульову матрицю необхідна зміна курсів не менше трьох суден. Тому спочатку розглянемо вибір безпечних курсів першого і другого суден.

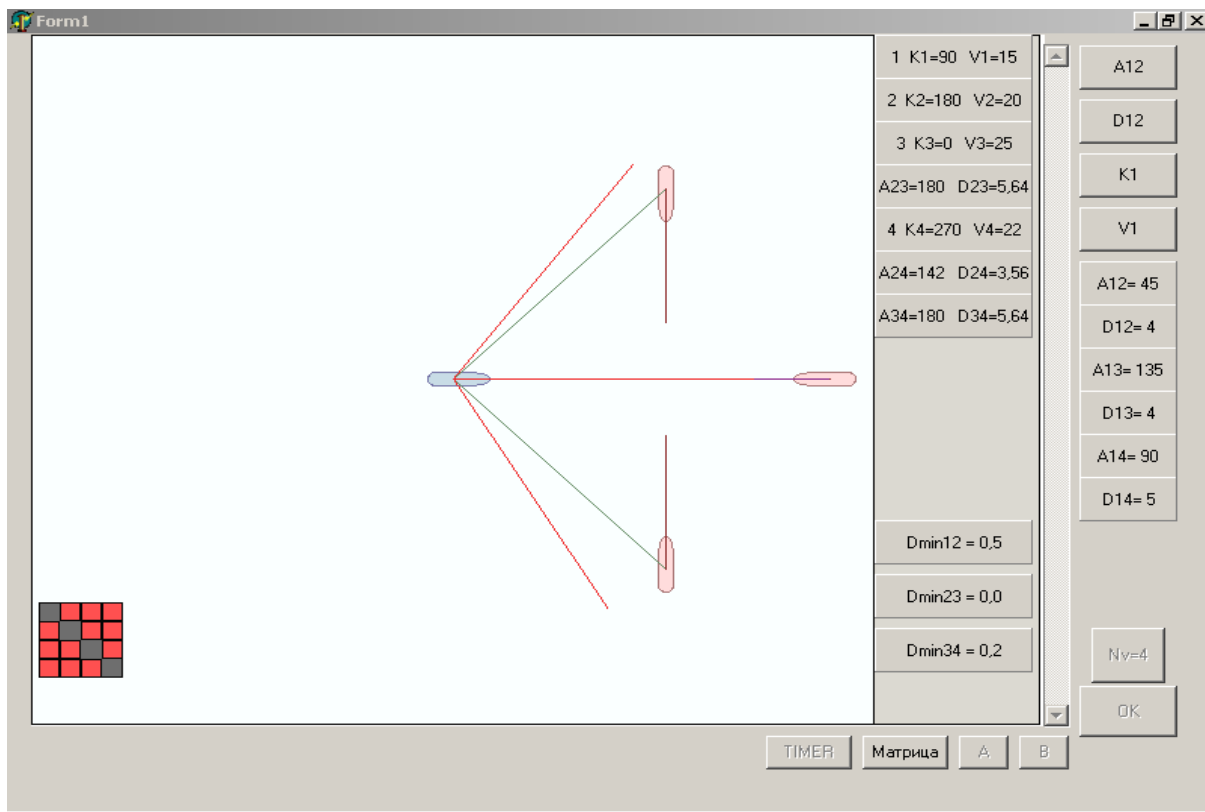


Рис. В.20. Можливість коректури початкової ситуації

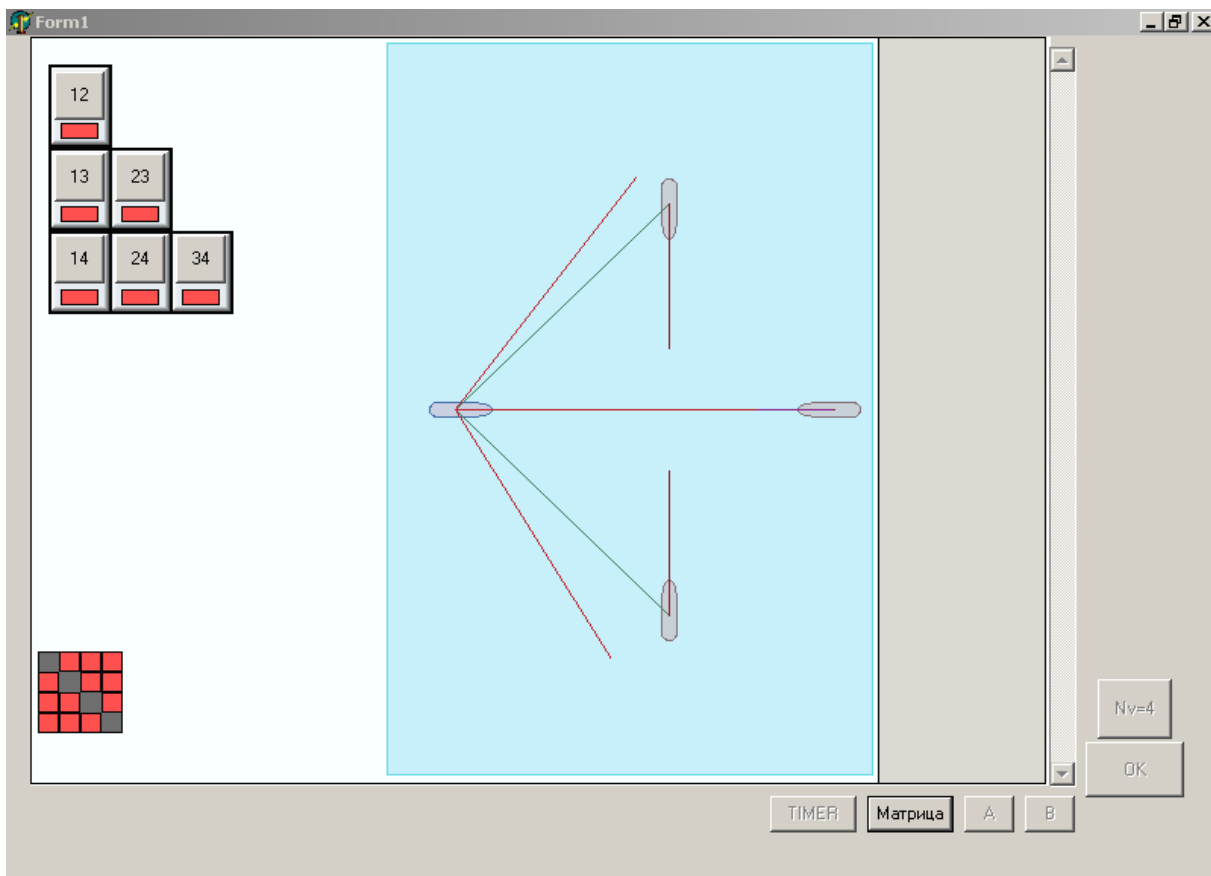


Рис. В.21. Вивід клавіш матриці ситуаційного збурення

Для виведення розширеної площині і області небезпечних курсів першого і другого суден «натискаємо» клавішу «12» в блоці клавіш матриці збурення, після чого відбувається відображення області, як показано на рис. В.22. Вибираємо курс першого судна К1 і починаємо зменшувати його значення до звернення в нуль ситуаційних збурень ω_{12} , ω_{13} і ω_{14} , як показано на рис. В.23, причому відповідні сектора індикатора безпеки приймають зелений колір.

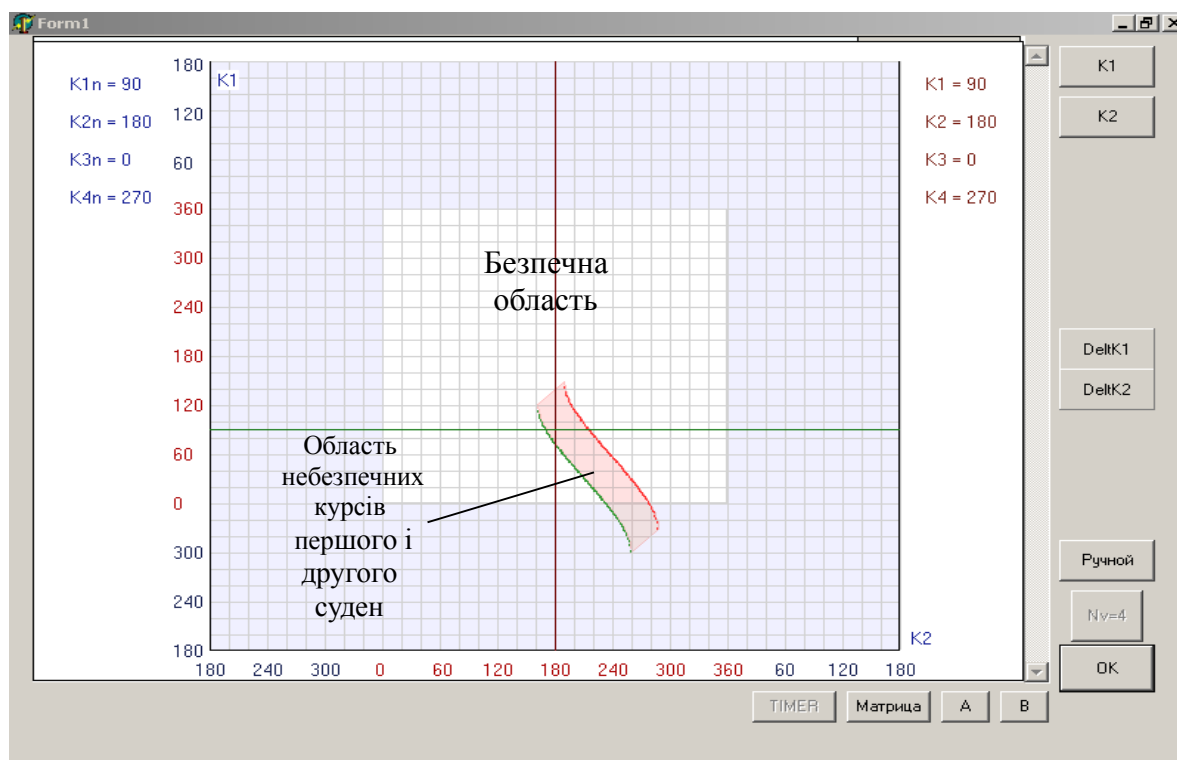


Рис. В.22. Область небезпечних курсів першого і другого суден

Потім за допомогою клавіші «K2» вибираємо курс другого судна і збільшуємо його за допомогою лінійки прокрутки, як показано на рис. В.24, до звернення в нуль ситуаційних збурень ω_{23} і ω_{24} , що видно з індикатора безпеки, відповідні сектора якого пофарбовані в зелений колір. Таким чином, п'ять ситуаційних збурень компенсовані зміною курсу першого судна на 64° вліво і курсу другого судна вправо на 88° .

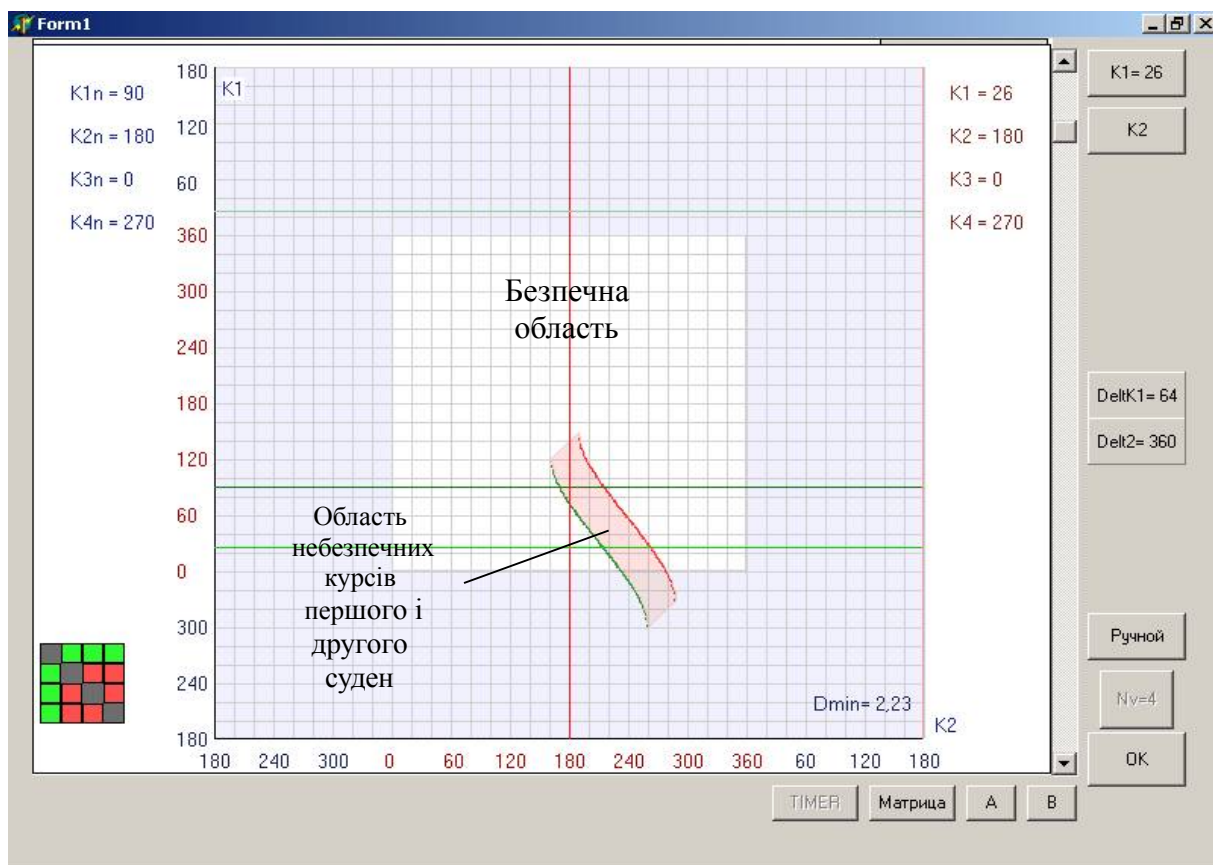


Рис. В.23. Вибір безпечного курсу K1 першого судна

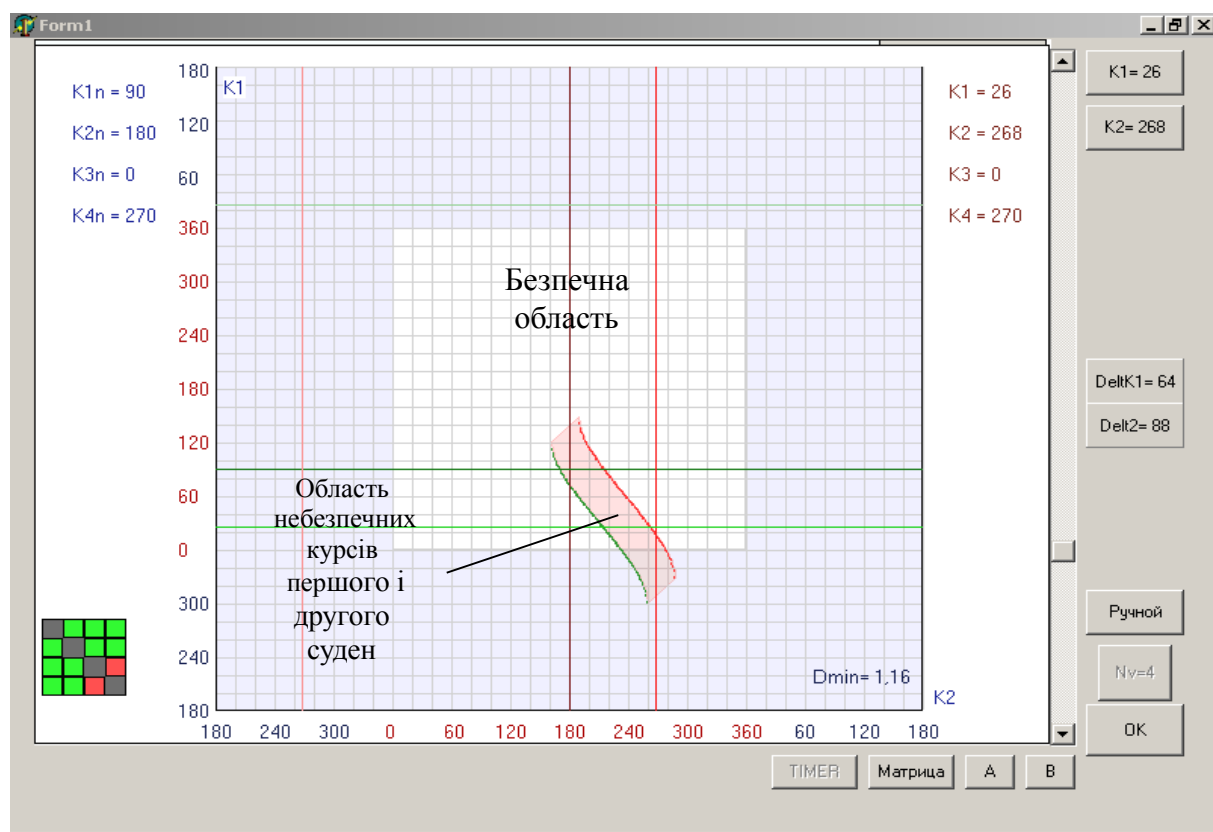


Рис. В.24. Вибір безпечного курсу K2 другого судна

Однак залишилося некомпенсованим ситуаційне збурення, для чого необхідно змінити курс третього або четвертого судна. У будь-якому випадку, потрібно мати вивід області небезпечних курсів третього і четвертого суден. Для цього за допомогою клавіші «Матриця» виводяться клавіші матриці ситуаційного збурення, з яких тільки клавіша «34» з червоним індикатором небезпеки, що показано на рис. В.25.

Використовуючи зазначену клавішу, а потім клавішу «А» виводимо на екран розширену площину курсів і область небезпечних курсів третього і четвертого суден, як показано на рис. В.26.

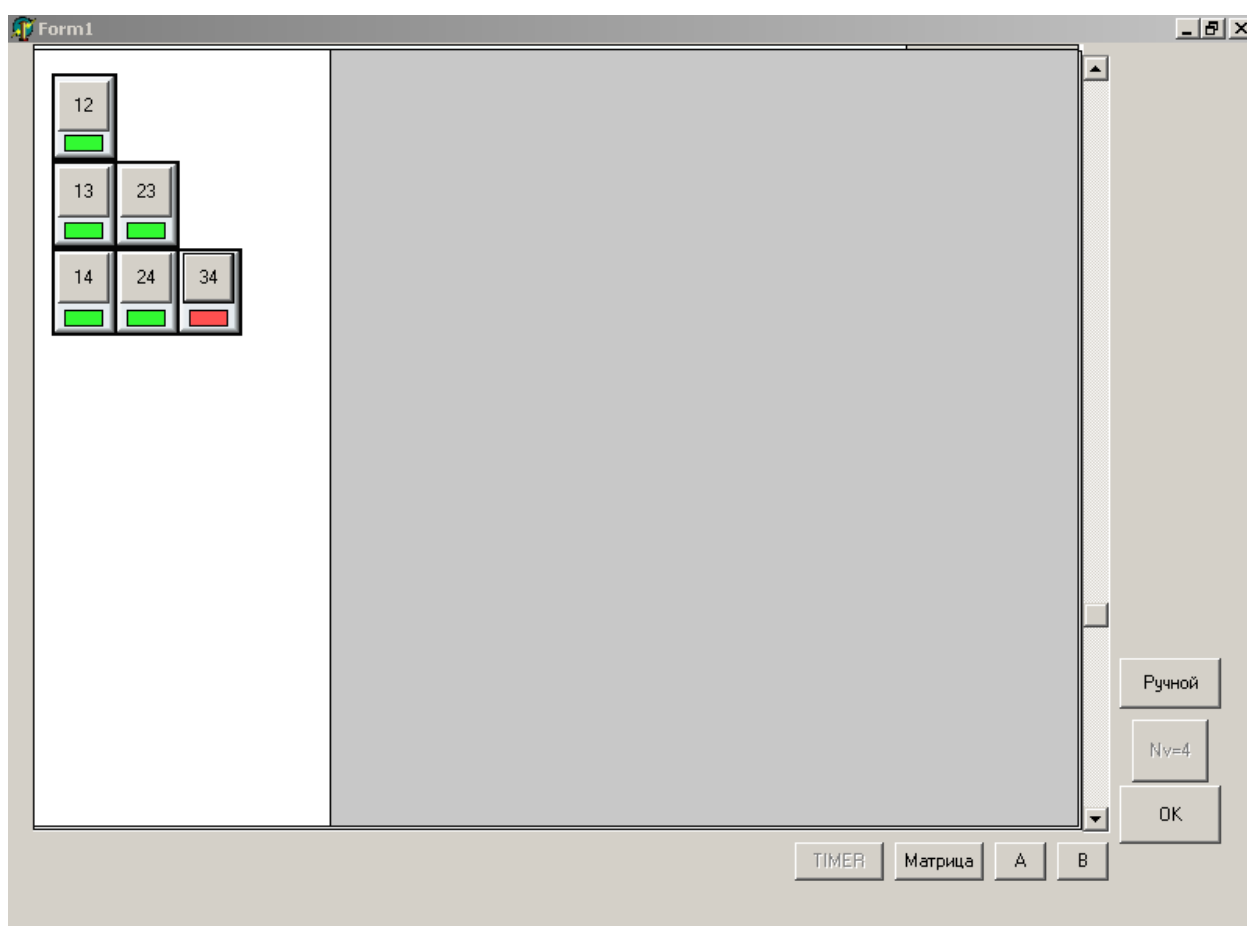


Рис. В.25. Вивід клавіш матриці ситуаційного збурення

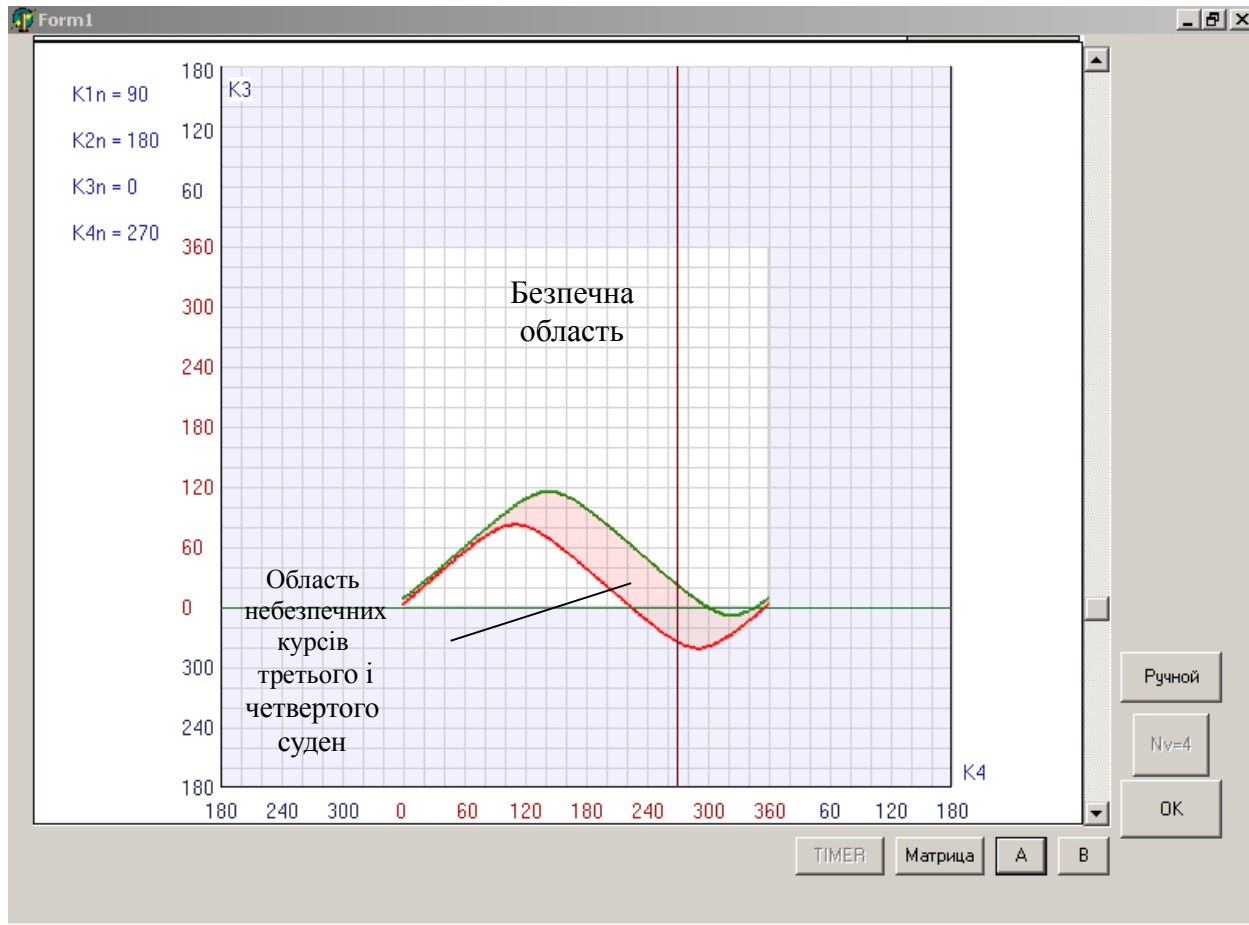


Рис. В.26. Область небезпечних курсів третього і четвертого суден.

Звертаємо увагу на ту обставину, що точка перетину початкових курсів суден належить області небезпечних курсів. Для виведення точки перетину курсів з області небезпечних курсів з мінімальною зміною курсу слід зробити відворот третього судна вправо до межі області. Як впливає з рис. В.27, це відбувається при повороті третього судна на курс 24° , індикатор небезпеки показує, що в цьому випадку матриця ситуаційного збурення перетворюється в нульову матрицю, а дистанція найкоротшого зближення третього і четвертого суден складе 1,03 милі.

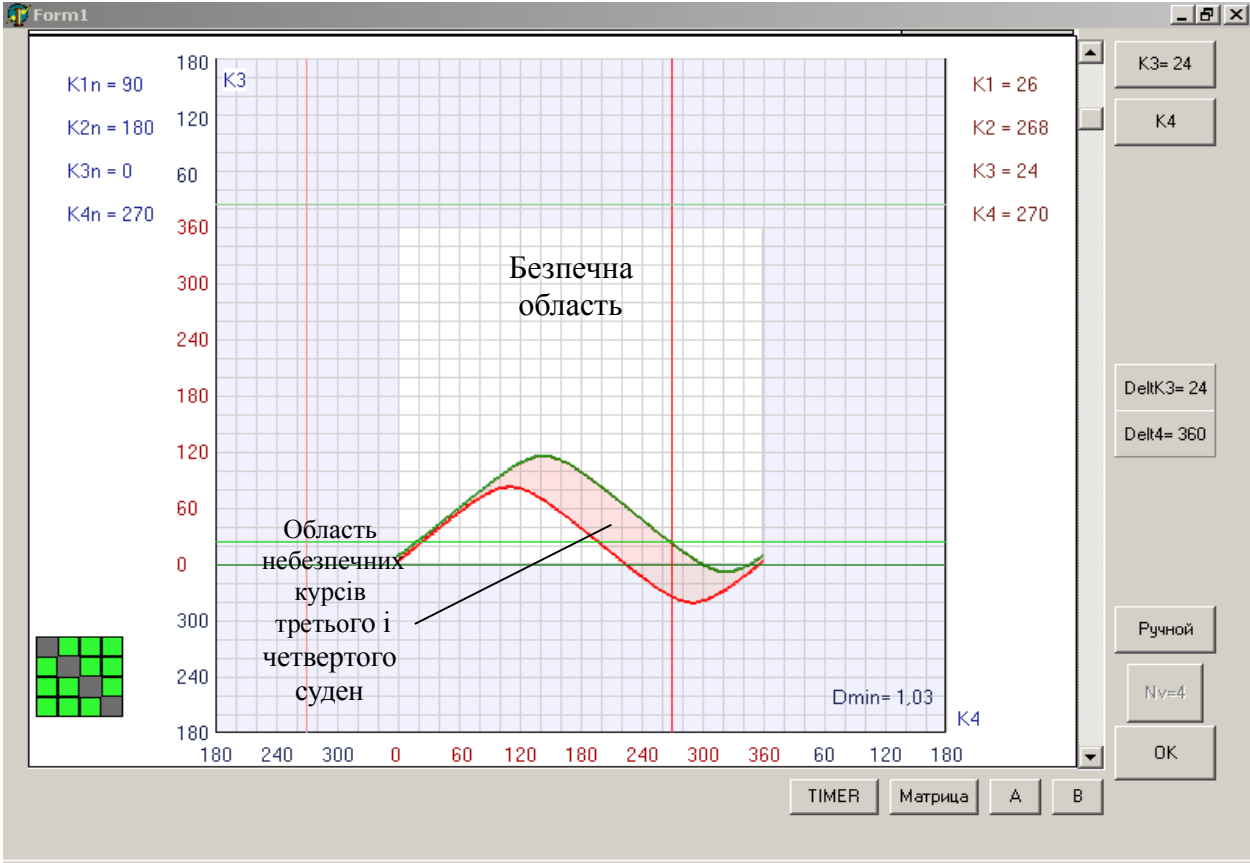


Рис. В.27. Вибір безпечного курсу третього судна

ДОДАТОК Г

Г.1. Пошук виразу для граничних відносних курсів відхилення в разі домену еліптичної форми

У випадку безпечного еліптичного домену, який позначено $D_b^{(El)}$, відносний курс мінімального ухилення K_{otymin} визначається дотичною до межі домену $D_b^{(El)}$, становище якої залежить від ракурсу цілі, оскільки напіввісі a_b та b_b домену збігаються за напрямком відповідно з подовжньою і поперечною осями цілі. З доменом $D_b^{(El)}$ пов'язуємо суднову систему координат XOY (рис. Г.1).

У цій системі координат рівняння еліпса має такий вигляд:

$$\frac{x^2}{a_b^2} + \frac{y^2}{b_b^2} = 1. \quad (Г.1)$$

Наведемо аналітичний вираз для безпечної зони при довільному розташуванні цілі в опорній системі координат $\overline{XOY}$, вісь якої $\overline{XX}$ збігається з полуденною лінією NS. Для цього розглянемо ще проміжну систему координат $\tilde{X}\tilde{O}\tilde{Y}$ (рис. Г.2).

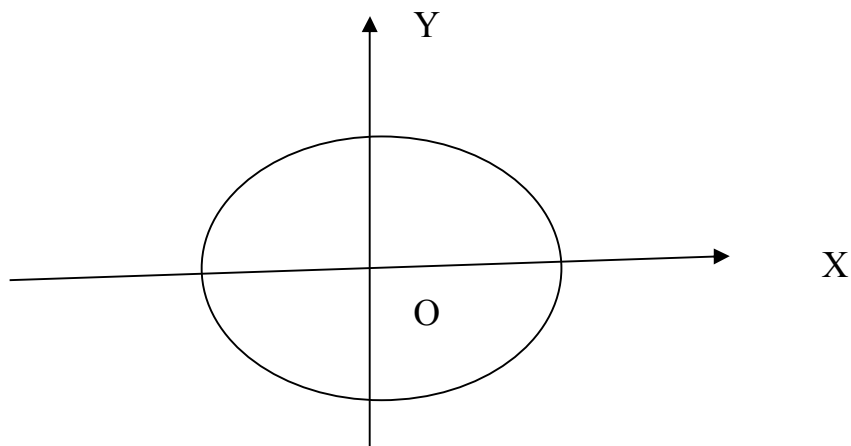


Рис. Г.1. Система координат XOY

Припустимо, на початку системи координат $\overline{XOY}$ знаходиться судно. Проміжна система координат $\tilde{X}\tilde{O}\tilde{Y}$ зміщена відносно початку опорної системи та її центр збігається з центром еліпса, хоча вісі обох систем координат паралельні (рис. Г.2). Початок системи координат XOY сполучений з початком $\tilde{X}\tilde{O}\tilde{Y}$, але вісі XOY повернені на кут курсу K_c відносно осей системи координат $\tilde{X}\tilde{O}\tilde{Y}$. Очевидно, справедливі співвідношення:

$$\bar{x} = \bar{X}_o + \tilde{x}, \quad \bar{y} = \bar{Y}_o + \tilde{y}, \quad (\text{Г.2})$$

де $\bar{X}_o$ та $\bar{Y}_o$ – координати центру еліпса в системі координат $\overline{XOY}$.

У свою чергу, як випливає з рис. Г.3, координати довільної точки $M(\tilde{x}, \tilde{y})$ в залежності від її координат (x, y) в системі XOY виражаються наступним чином:

$$\tilde{x} = y \sin K_c + x \cos K_c, \quad \tilde{y} = y \cos K_c - x \sin K_c.$$

В цьому випадку вираз (Г.2) приймає наступний вигляд:

$$\begin{aligned} \bar{x} &= \bar{X}_o + y \sin K_c + x \cos K_c, \\ \bar{y} &= \bar{Y}_o + y \cos K_c - x \sin K_c. \end{aligned} \quad (\text{Г.3})$$

Використовуючи вихідне рівняння еліпса (Г.1) в системі координат XOY , отримаємо наступне співвідношення:

$$y = \pm b \sqrt{1 - \frac{x^2}{a^2}}.$$

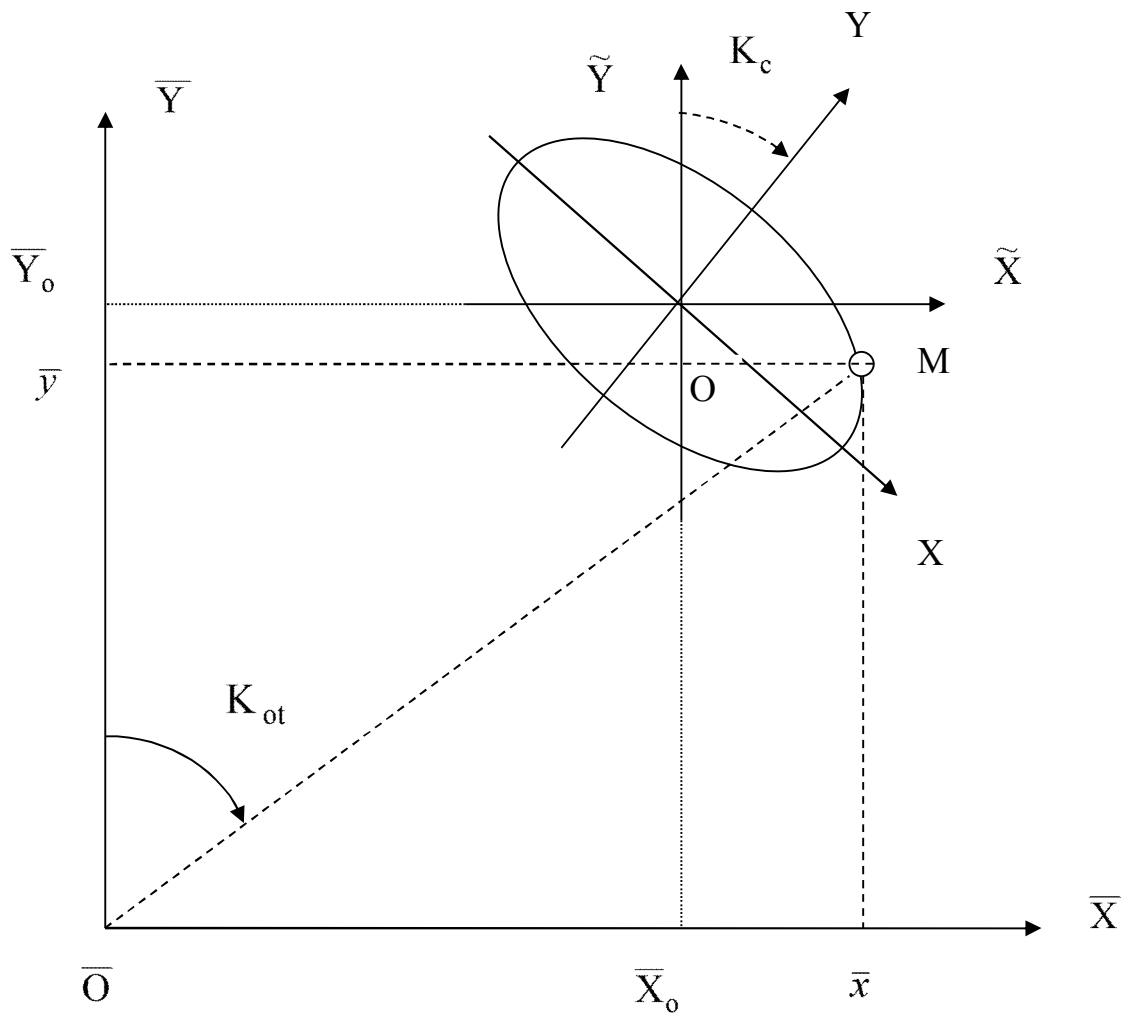


Рис. Г.2. Зв'язок між системами координат

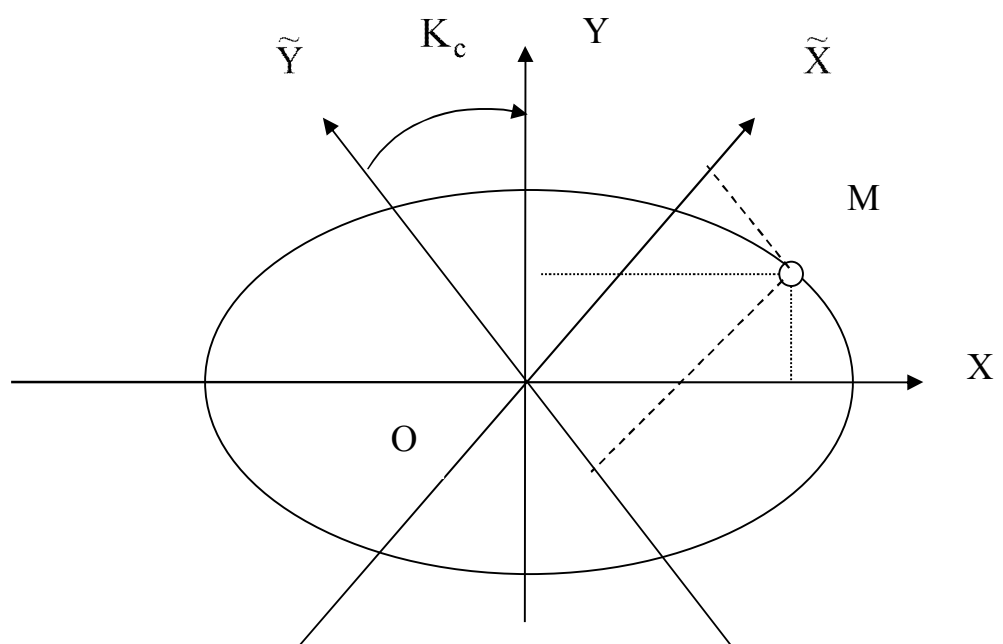


Рис. Г.3. Перетворення координат

Вибираючи відповідне значення y (наприклад, зі знаком плюс) і підставляючи в виразі (Г.3), отримаємо:

$$\begin{aligned}\bar{x} &= \bar{X}_o + b\sqrt{1 - \frac{x^2}{a^2}} \sin K_c + x \cos K_c, \\ \bar{y} &= \bar{Y}_o + b\sqrt{1 - \frac{x^2}{a^2}} \cos K_c - x \sin K_c.\end{aligned}\quad (\text{Г.4})$$

Значення відносного курсу K_{ot} , що проходить через точку M і належить еліпсу в опорній системі координат $\overline{XOY}$, можна знайти з виразу (рис. Г.2):

$$\text{tg} K_{ot} = \frac{\bar{x}}{\bar{y}},$$

звідки випливає

$$K_{ot} = \text{arctg} \frac{\bar{x}}{\bar{y}} = \text{arctg} \frac{\bar{X}_o + b\sqrt{1 - \frac{x^2}{a^2}} \sin K_c + x \cos K_c}{\bar{Y}_o + b\sqrt{1 - \frac{x^2}{a^2}} \cos K_c - x \sin K_c}. \quad (\text{Г.5})$$

Надалі для зручності запису відносний граничний курс ухилення судна позначимо K_{ymin} .

Для знаходження граничного курсу ухилення судна K_{ymin} при ухиленні вправо необхідно знайти першу похідну відносного курсу K_{ot} по змінній x ($x \in [-a, a]$) і прирівняти її до нуля. З отриманого рівняння слід знайти значення змінної x , при яких досягаються екстремальні значення пеленга, а потім знайти K_{ymin} , підставляючи отримані значення x в формулу (Г.5). Продиференціюємо по x вираз (Г.5):

$$\frac{\partial K_{ot}}{\partial x} = \frac{1}{1 + \left(\frac{\bar{x}}{\bar{y}}\right)^2} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\bar{x}}{\bar{y}}\right).$$

Очевидно, шуканому рівнянню $\frac{\partial K_{ot}}{\partial x} = 0$ відповідає $\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\bar{x}}{\bar{y}}\right) = 0$.

Знайдемо вираз для $\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\bar{x}}{\bar{y}}\right)$. Так, як $\bar{x}$ і $\bar{y}$ залежать від змінної x , відповідно:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\bar{x}}{\bar{y}}\right) = \frac{\frac{\partial \bar{x}}{\partial x} \bar{y} - \frac{\partial \bar{y}}{\partial x} \bar{x}}{\bar{y}^2},$$

тому вихідне рівняння приймає вид:

$$\frac{\partial \bar{x}}{\partial x} \bar{y} - \frac{\partial \bar{y}}{\partial x} \bar{x} = 0. \quad (\Gamma.6)$$

З виразу (7.5) сьомого розділу знайдемо часткові похідні $\frac{\partial \bar{x}}{\partial x}$ і $\frac{\partial \bar{y}}{\partial x}$:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{x}}{\partial x} &= \cos K_c - \frac{b}{a^2} \sin K_c \frac{x}{\sqrt{1 - \frac{x^2}{a^2}}}, \\ \frac{\partial \bar{y}}{\partial x} &= \frac{b}{a^2} \cos K_c \frac{x}{\sqrt{1 - \frac{x^2}{a^2}}} + \sin K_c. \end{aligned}$$

Підставляючи останні вирази в рівняння (Г.6), отримаємо:

$$\begin{aligned}
& \left(\cos K_c - \frac{b}{a^2} \sin K_c \frac{x}{\sqrt{1 - \frac{x^2}{a^2}}} \right) \left(\bar{Y}_o + b \sqrt{1 - \frac{x^2}{a^2}} \cos K_c - x \sin K_c \right) + \\
& + \left(\frac{b}{a^2} \cos K_c \frac{x}{\sqrt{1 - \frac{x^2}{a^2}}} + \sin K_c \right) \left(\bar{X}_o + b \sqrt{1 - \frac{x^2}{a^2}} \sin K_c + x \cos K_c \right) = 0.
\end{aligned}$$

Виконаємо перетворення і отримаємо:

$$\begin{aligned}
& \bar{Y}_o \cos K_c + \bar{X}_o \sin K_c + \frac{b}{a^2} \frac{x}{\sqrt{1 - \frac{x^2}{a^2}}} (\bar{X}_o \cos K_c - \bar{Y}_o \sin K_c) + \\
& + b \sqrt{1 - \frac{x^2}{a^2}} (\sin^2 K_c + \cos^2 K_c) + \frac{b}{a^2} \frac{x^2}{\sqrt{1 - \frac{x^2}{a^2}}} (\sin^2 K_c + \cos^2 K_c) = 0,
\end{aligned}$$

спростимо отриманий вираз:

$$\bar{Y}_o \cos K_c + \bar{X}_o \sin K_c + \frac{b}{a^2} \frac{x}{\sqrt{1 - \frac{x^2}{a^2}}} (\bar{X}_o \cos K_c - \bar{Y}_o \sin K_c) + b \sqrt{1 - \frac{x^2}{a^2}} + \frac{b}{a^2} \frac{x^2}{\sqrt{1 - \frac{x^2}{a^2}}} = 0.$$

Перепишемо останнє рівняння наступним чином:

$$\frac{b}{a^2} \frac{x}{\sqrt{1 - \frac{x^2}{a^2}}} (\bar{Y}_o \sin K_c - \bar{X}_o \cos K_c) = \bar{Y}_o \cos K_c + \bar{X}_o \sin K_c + b \sqrt{1 - \frac{x^2}{a^2}} + \frac{b}{a^2} \frac{x^2}{\sqrt{1 - \frac{x^2}{a^2}}},$$

звідки отримаємо рівняння, що містить в лівій частині змінну x :

$$x = \frac{a^2}{b(\bar{Y}_o \sin K_c - \bar{X}_o \cos K_c)} [(\bar{Y}_o \cos K_c + \bar{X}_o \sin K_c) \sqrt{1 - \frac{x^2}{a^2}} + b(1 - \frac{x^2}{a^2}) + \frac{b}{a^2} x^2].$$

Отриманий вираз можна записати в наступному вигляді:

$$x = c[r \sqrt{1 - \frac{x^2}{a^2}} + b(1 - \frac{x^2}{a^2}) + \frac{b}{a^2} x^2], \quad (\Gamma.7)$$

$$\text{де } c = \frac{a^2}{b(\bar{Y}_o \sin K_c - \bar{X}_o \cos K_c)} \text{ і } r = (\bar{Y}_o \cos K_c + \bar{X}_o \sin K_c).$$

Рівняння (Г.7) запишемо в такий спосіб:

$$x + cb = cr \sqrt{1 - \frac{x^2}{a^2}}.$$

Зведемо в квадрат обидві частини останнього рівняння:

$$x^2 + 2cbx + c^2b^2 = c^2r^2(1 - \frac{x^2}{a^2}),$$

або

$$(a^2 + c^2r^2)x^2 + 2a^2cbx + a^2(c^2b^2 - c^2r^2) = 0.$$

Остаточно отримаємо квадратне рівняння:

$$x^2 + 2 \frac{a^2cb}{(a^2 + c^2r^2)} x + \frac{a^2c^2(b^2 - r^2)}{(a^2 + c^2r^2)} = 0. \quad (\Gamma.8)$$

Рішення x_1 і x_2 квадратного рівняння (Г.8) рівні:

$$x_1 = -\frac{a^2 cb}{a^2 + c^2 r^2} + \sqrt{\left(\frac{a^2 cb}{a^2 + c^2 r^2}\right)^2 - \frac{a^2 c^2 (b^2 - r^2)}{(a^2 + c^2 r^2)}},$$

$$x_2 = -\frac{a^2 cb}{a^2 + c^2 r^2} - \sqrt{\left(\frac{a^2 cb}{a^2 + c^2 r^2}\right)^2 - \frac{a^2 c^2 (b^2 - r^2)}{(a^2 + c^2 r^2)}}.$$

Кожному з отриманих коренів у рівнянні еліпса відповідає дві координати у, тому відносний граничний курс ухилення судна $\bar{K}_{ymin}$ досягається в одній з чотирьох точок еліпса (рис. Г.4).

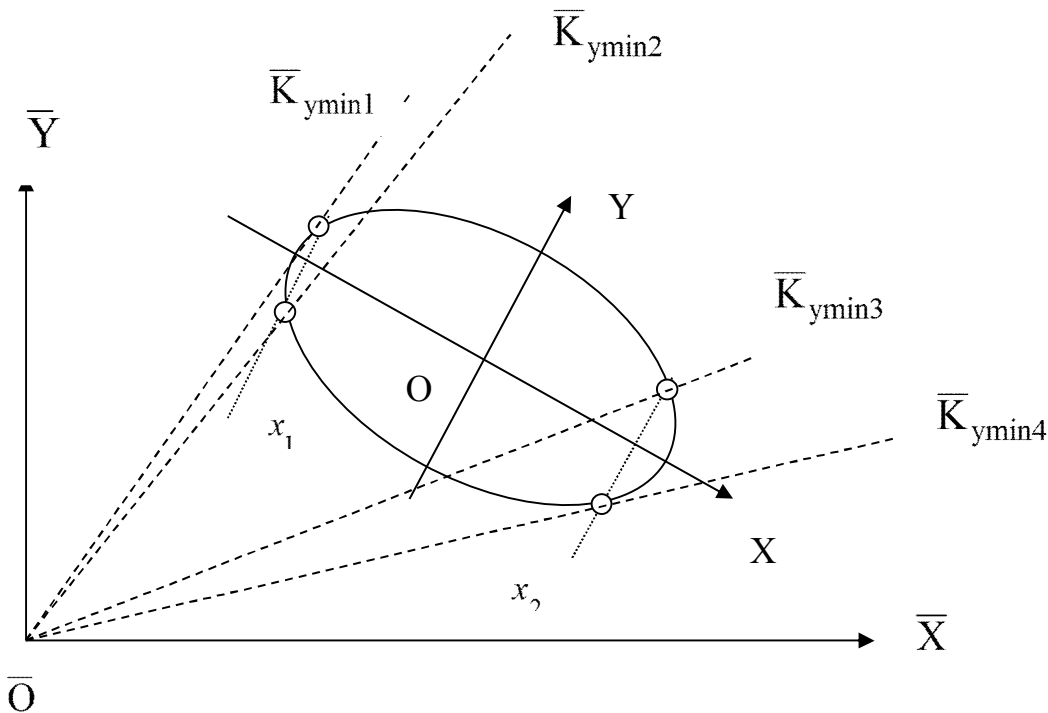


Рис. Г.4. Визначення відносного курсу ухилення $\bar{K}_{ymin}$

Тому спочатку необхідно обчислити значення чотирьох відносних граничних курсів ухилення, що відповідають отриманими кореням x_1 і x_2 за допомогою приведених нижче виразів, отриманих за допомогою формули (Г.5):

$$\begin{aligned}
\bar{K}_{ymin1} &= \operatorname{arctg} \frac{\bar{X}_o + b \sqrt{1 - \frac{x_1^2}{a^2}} \sin K_c + x_1 \cos K_c}{\bar{Y}_o + b \sqrt{1 - \frac{x_1^2}{a^2}} \cos K_c - x_1 \sin K_c}, \\
\bar{K}_{ymin2} &= \operatorname{arctg} \frac{\bar{X}_o - b \sqrt{1 - \frac{x_1^2}{a^2}} \sin K_c + x_1 \cos K_c}{\bar{Y}_o - b \sqrt{1 - \frac{x_1^2}{a^2}} \cos K_c - x_1 \sin K_c}, \\
\bar{K}_{ymin3} &= \operatorname{arctg} \frac{\bar{X}_o + b \sqrt{1 - \frac{x_2^2}{a^2}} \sin K_c + x_2 \cos K_c}{\bar{Y}_o + b \sqrt{1 - \frac{x_2^2}{a^2}} \cos K_c - x_2 \sin K_c}, \\
\bar{K}_{ymin4} &= \operatorname{arctg} \frac{\bar{X}_o - b \sqrt{1 - \frac{x_2^2}{a^2}} \sin K_c + x_2 \cos K_c}{\bar{Y}_o - b \sqrt{1 - \frac{x_2^2}{a^2}} \cos K_c - x_2 \sin K_c}.
\end{aligned} \tag{Г.9}$$

Після розрахунку значень $\bar{K}_{ymin1}$, $\bar{K}_{ymin2}$, $\bar{K}_{ymin3}$ і $\bar{K}_{ymin4}$ шукані величини відносних граничних курсів ухилення судна K_{ot}^s і K_{ot}^p знаходиться з виразів:

$$K_{ot}^s = \max \{ \bar{K}_{ymin1}, \bar{K}_{ymin2}, \bar{K}_{ymin3}, \bar{K}_{ymin4} \}.$$

$$K_{ot}^p = \min \{ \bar{K}_{ymin1}, \bar{K}_{ymin2}, \bar{K}_{ymin3}, \bar{K}_{ymin4} \}.$$

Отримані вирази (Г.5) справедливі в разі, коли значення $\bar{x}$ і $\bar{y}$ одночасно є позитивними. Якщо ця умова не виконується, то в разі, коли $\bar{y} = 0$ при $\bar{x} > 0$ значення $\bar{K}_{ymin} = 90^\circ$, а при $\bar{x} < 0$ $\bar{K}_{ymin} = 270^\circ$.

Якщо ж $\bar{y} > 0$, то при $\bar{x} < 0$ $\bar{K}_{ymin} = 360^\circ - \arctg \frac{\bar{x}}{\bar{y}}$, а в випадку $\bar{y} < 0$ і $\bar{x} \neq 0$ значення $\bar{K}_{ymin} = 180^\circ + \arctg \frac{\bar{x}}{\bar{y}}$ з врахуванням знаку $\bar{x}$.

Звертаємо увагу на таку обставину: розрахунки відносного мінімального курсу ухилення судна $\bar{K}_{ymin}$ проводилися щодо центру еліпса зони безпеки $(\bar{X}_o, \bar{Y}_o)$, а при вимірах виявляємо позицію цілі, яка не збігається з центром еліпса. Тому необхідно висловити координати центру еліпса $(\bar{X}_o, \bar{Y}_o)$ через параметри відносної позиції цілі, тобто дистанцію D_v і пеленг на неї α_v . Якщо позначити $\bar{X}_v$ і $\bar{Y}_v$ координати цілі в опорній системі координат, то очевидно (рис. Г.5) мають місце співвідношення:

$$\bar{X}_v = D_v \sin \alpha_v; \quad \bar{Y}_v = D_v \cos \alpha_v.$$

Так як відстань dL_e між центрами еліпса і судна, як видно з рис. Г.5, можна знайти із співвідношення $dL_e = a_b - l_k$, то дистанція D_o і пеленг α_o на центр еліпса визначаються з виразів:

$$D_o = \sqrt{(\bar{X}_v + dL_e \sin K_c)^2 + (\bar{Y}_v + dL_e \cos K_c)^2},$$

$$\alpha_o = 360 + \bar{\alpha}_n, \text{ при } \bar{Y}_v + dL_e \cos K_c > 0;$$

$$\alpha_o = 180 + \bar{\alpha}_n, \text{ при } \bar{Y}_v + dL_e \cos K_c < 0,$$

$$\text{де } \bar{\alpha}_n = \arctg \frac{\bar{X}_v + dL_e \sin K_c}{\bar{Y}_v + dL_e \cos K_c}.$$

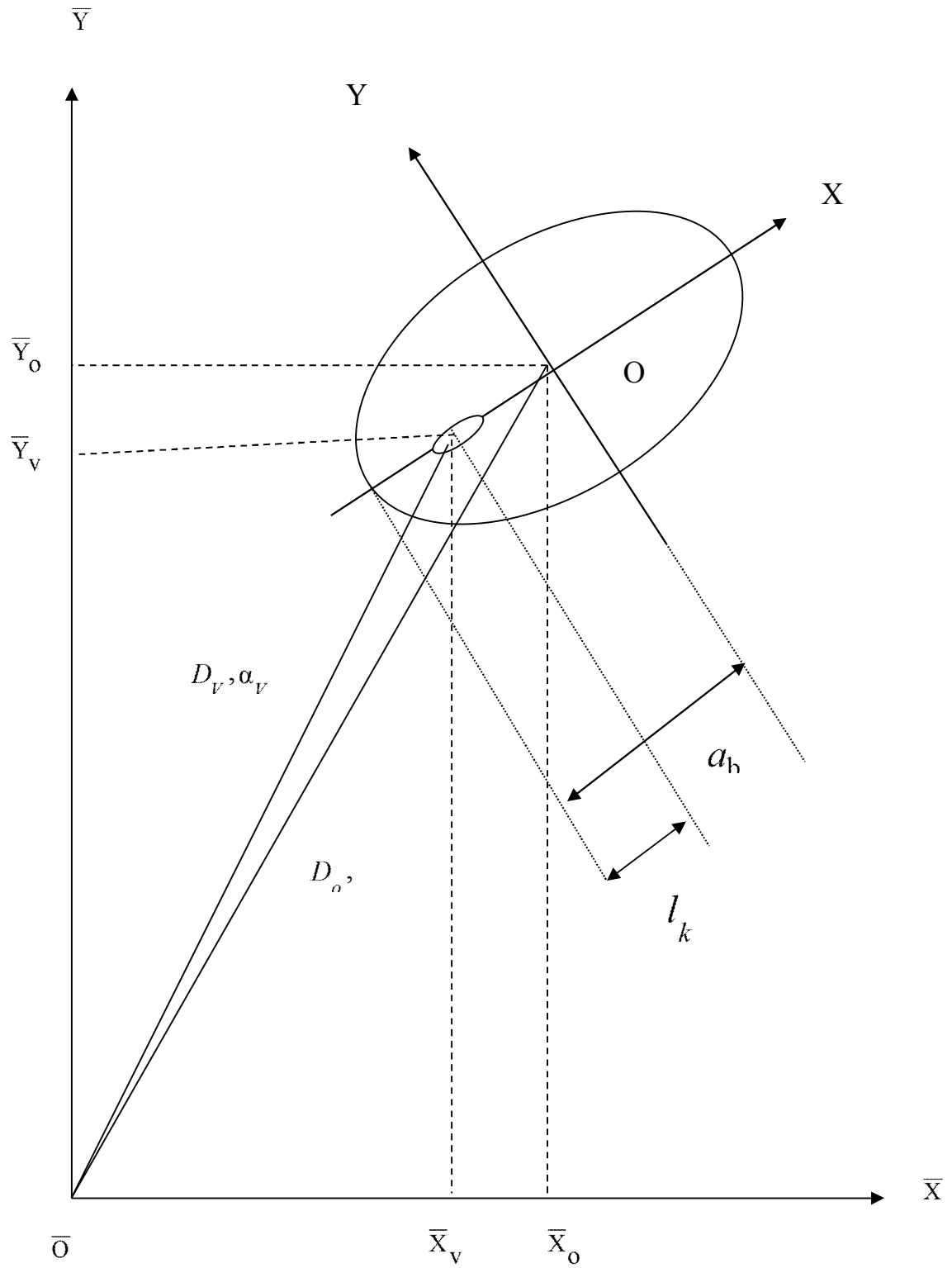


Рис. Г.5. Зв'язок центрів судна і еліпсу

Остаточно вираження для $\bar{X}_o$ і $\bar{Y}_o$ приймають такий вигляд:

$$\bar{X}_o = D_o \sin \alpha_o, \quad \bar{Y}_o = D_o \cos \alpha_o.$$

Підставляючи отримані значення $\bar{X}_o$ і $\bar{Y}_o$ в (Г.9) розраховуємо значення $\bar{K}_{ymin}$ з урахуванням зміщення центру еліпса щодо обсервованного місця цілі.

Г.2. Процедура розрахунку граничних відносних курсів ухилення для безпечного домену $D_b^{(RE)}$ складної форми.

Складний домен $D_b^{(RE)}$ являє собою комбінацію половини еліпса і половини кола. Як раніше вказувалося, граничний відносний курс ухилення судна є дотичною з місця судна до безпечної домену цілі. В даному випадку, в залежності від курсового кута цілі $\beta = \alpha_c - K_c$ (α_c – пеленг з цілі на судно) дотична з місця судна може бути до еліпсу або до кола, як показано на рис. Г.6. Причому, як впливає з того ж рис. Г.6, при курсових кутах лівого борту положення дотичної визначається колом, а якщо курсові кути цілі правого борта, то положення дотичної характеризується еліпсом. Отже, мінімальний курс ухилення судна $\bar{K}_{ymin}$ в залежності від курсового кута цілі обчислюється за різними формулами.

У разі коли дотична до півкола безпечної області $D_b^{(RE)}$, відносний мінімальний курс ухилення судна $\bar{K}_{ymin}$ розраховується за допомогою формули:

$$\bar{K}_{ymin} = K_{otn} + \arcsin \frac{R_b}{D}.$$

З аналізу цієї формули випливає, що відносний курс $\bar{K}_{ymin}$ не залежить

від курсу цілі K_c і його значення незмінне. Тому для курсових кутів цілі β лівого борту, що аналітично виражається нерівністю $\sin \beta < 0$, відносний мінімальний курс ухилення судна $\bar{K}_{ymin}$ розраховується за наведеним виразом.

При курсових кутах цілі β правого борту, як впливає з рис. Г.6, відносний мінімальний курс ухилення судна $\bar{K}_{ymin}$ дорівнює дотичній до напівеліпсу безпечної області складної форми $D_b^{(RE)}$, причому умова реалізації курсового кута цілі β визначається нерівністю $\sin \beta > 0$.

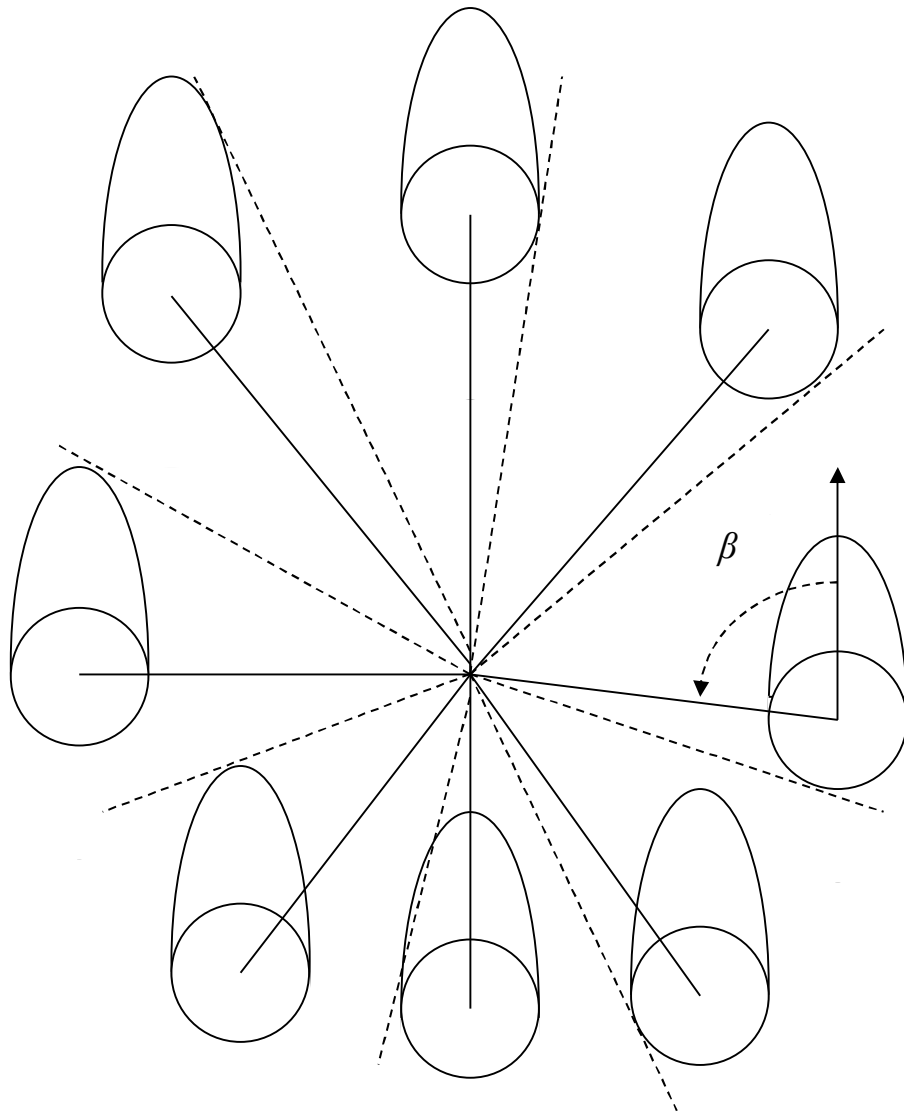


Рис. Г.6. Положення дотичної по відношенню до домену $D_b^{(RE)}$

У загальному випадку відносний мінімальний курс ухилення судна $\bar{K}_{ymin}$ визначається виразом:

$$\bar{K}_{ymin} = \begin{cases} K_{otn} + \arcsin \frac{R_b}{D}, & \text{если } \sin \beta < 0, \\ \max \{ \bar{K}_{ymin1}, \bar{K}_{ymin2}, \bar{K}_{ymin3}, \bar{K}_{ymin4} \}, & \text{если } \sin \beta > 0, \end{cases} \quad (Г.10)$$

в якому

$$\bar{K}_{ymin1} = \arctg \frac{\bar{X}_o + b \sqrt{1 - \frac{x_1^2}{a^2}} \sin K_c + x_1 \cos K_c}{\bar{Y}_o + b \sqrt{1 - \frac{x_1^2}{a^2}} \cos K_c - x_1 \sin K_c},$$

$$\bar{K}_{ymin2} = \arctg \frac{\bar{X}_o - b \sqrt{1 - \frac{x_1^2}{a^2}} \sin K_c + x_1 \cos K_c}{\bar{Y}_o - b \sqrt{1 - \frac{x_1^2}{a^2}} \cos K_c - x_1 \sin K_c},$$

$$\bar{K}_{ymin3} = \arctg \frac{\bar{X}_o + b \sqrt{1 - \frac{x_2^2}{a^2}} \sin K_c + x_2 \cos K_c}{\bar{Y}_o + b \sqrt{1 - \frac{x_2^2}{a^2}} \cos K_c - x_2 \sin K_c},$$

$$\bar{K}_{ymin4} = \arctg \frac{\bar{X}_o - b \sqrt{1 - \frac{x_2^2}{a^2}} \sin K_c + x_2 \cos K_c}{\bar{Y}_o - b \sqrt{1 - \frac{x_2^2}{a^2}} \cos K_c - x_2 \sin K_c}.$$

Г.3. Розрахунок граничних відносних курсів ухилення для безпечного домену $D_b^{(Rt)}$ прямокутної форми.

Безпечний домен цілі $D_b^{(Rt)}$ прямокутної форми доцільно завдавати відносно центру цілі чотирма кутовими точками А, В, С і D (рис. Г.7).

Положення кутових точок А, В, С та D відносно центру будемо задавати дистанціями D_n , D_k і кутами ψ_n , ψ_k . Значення D_n , D_k , ψ_n та ψ_k в залежності від параметрів l_n , l_k та b безпечної області визначаються, як впливає з рис. Г.7, в такий спосіб:

$$\psi_n = \arctg \frac{b}{2l_n}, \quad \psi_k = \arctg \frac{b}{2l_k}, \quad D_n = \sqrt{\frac{b^2}{4} + l_n^2}, \quad D_k = \sqrt{\frac{b^2}{4} + l_k^2}.$$

З урахуванням отриманих виразів положення кутових точок в судновий системі координат ХОУ визначається наступним чином:

$$\begin{aligned} X_A &= D_n \sin \psi_n, \quad Y_A = D_n \cos \psi_n, \\ X_B &= D_k \sin(\pi - \psi_k), \quad Y_B = D_k \cos(\pi - \psi_k), \\ X_C &= D_k \sin(\pi + \psi_k), \quad Y_C = D_k \cos(\pi + \psi_k), \\ X_D &= D_n \sin(2\pi - \psi_n), \quad Y_D = D_n \cos(2\pi - \psi_n). \end{aligned}$$

Для отримання формул розрахунку відносних мінімальних курсів ухилення, що проходять через кутові точки слід ввести опорну $\overline{ХОУ}$ і проміжну $\tilde{ХОУ}$ системи координат (рис. Г.8). При курсі цілі K_c і положенні його центру $\bar{X}_o$, $\bar{Y}_o$ в системі координат $\overline{ХОУ}$, координати критичних точок А, В, С і D в цій же системі координат визначаються, як впливає з того ж рис. Г.8, наступними формулами:

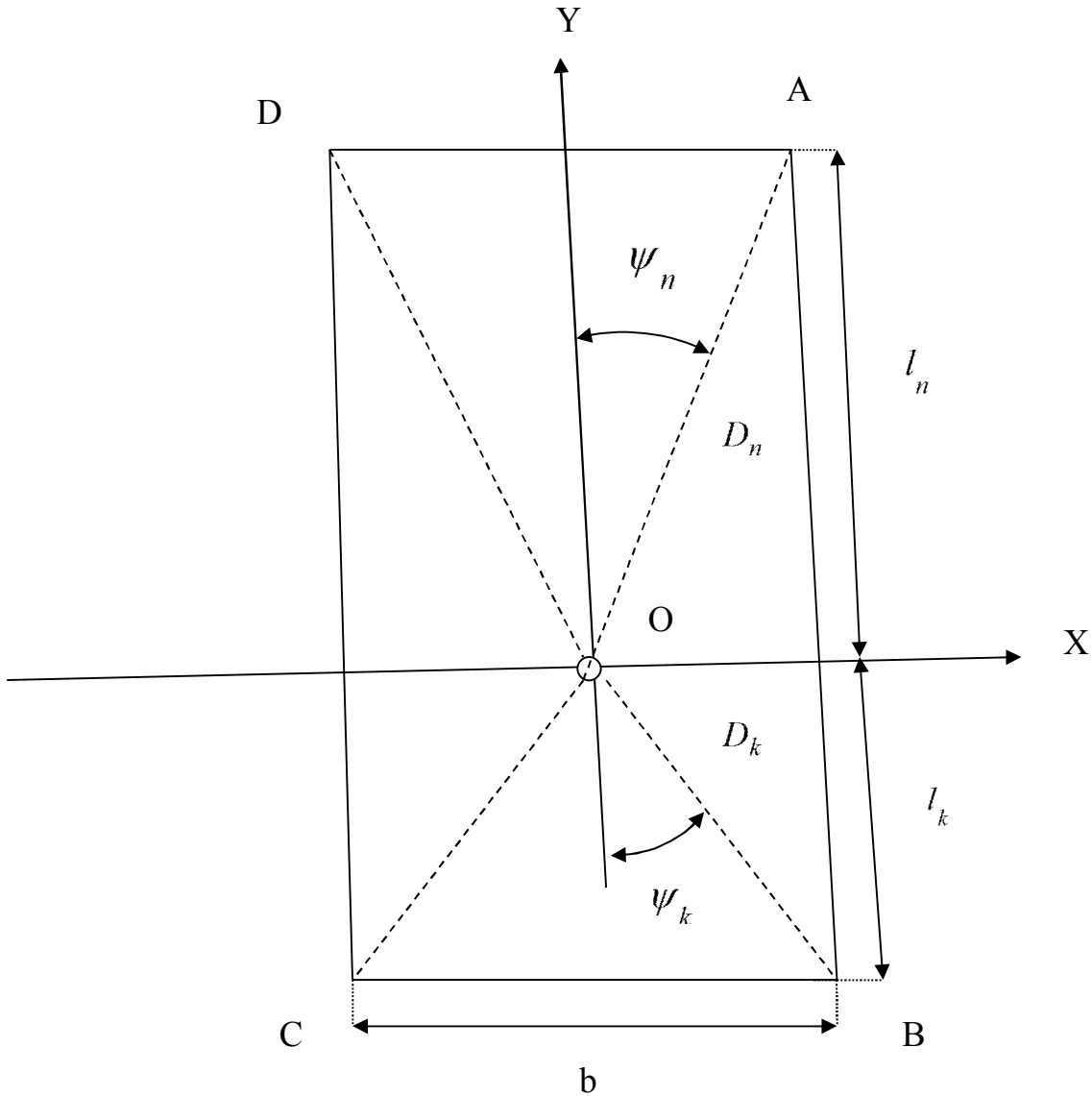


Рис. Г.7. Параметри домену $D_b^{(Rt)}$ прямокутної форми

$$\begin{aligned}\bar{X}_A &= \bar{X}_o + D_n \sin(\psi_n + K_c), \quad \bar{Y}_A = \bar{Y}_o + D_n \cos(\psi_n + K_c), \\ \bar{X}_B &= \bar{X}_o + D_k \sin(\pi - \psi_k + K_c), \quad \bar{Y}_B = \bar{Y}_o + D_k \cos(\pi - \psi_k + K_c), \\ \bar{X}_C &= \bar{X}_o + D_k \sin(\pi + \psi_k + K_c), \quad \bar{Y}_C = \bar{Y}_o + D_k \cos(\pi + \psi_k + K_c), \\ \bar{X}_D &= \bar{X}_o + D_n \sin(2\pi - \psi_n + K_c), \quad \bar{Y}_D = \bar{Y}_o + D_n \cos(2\pi - \psi_n + K_c).\end{aligned}$$

Значення відносного курсу ухилення $\bar{K}_{yminI}$, що проходить через кутові точки буде визначатися виразами:

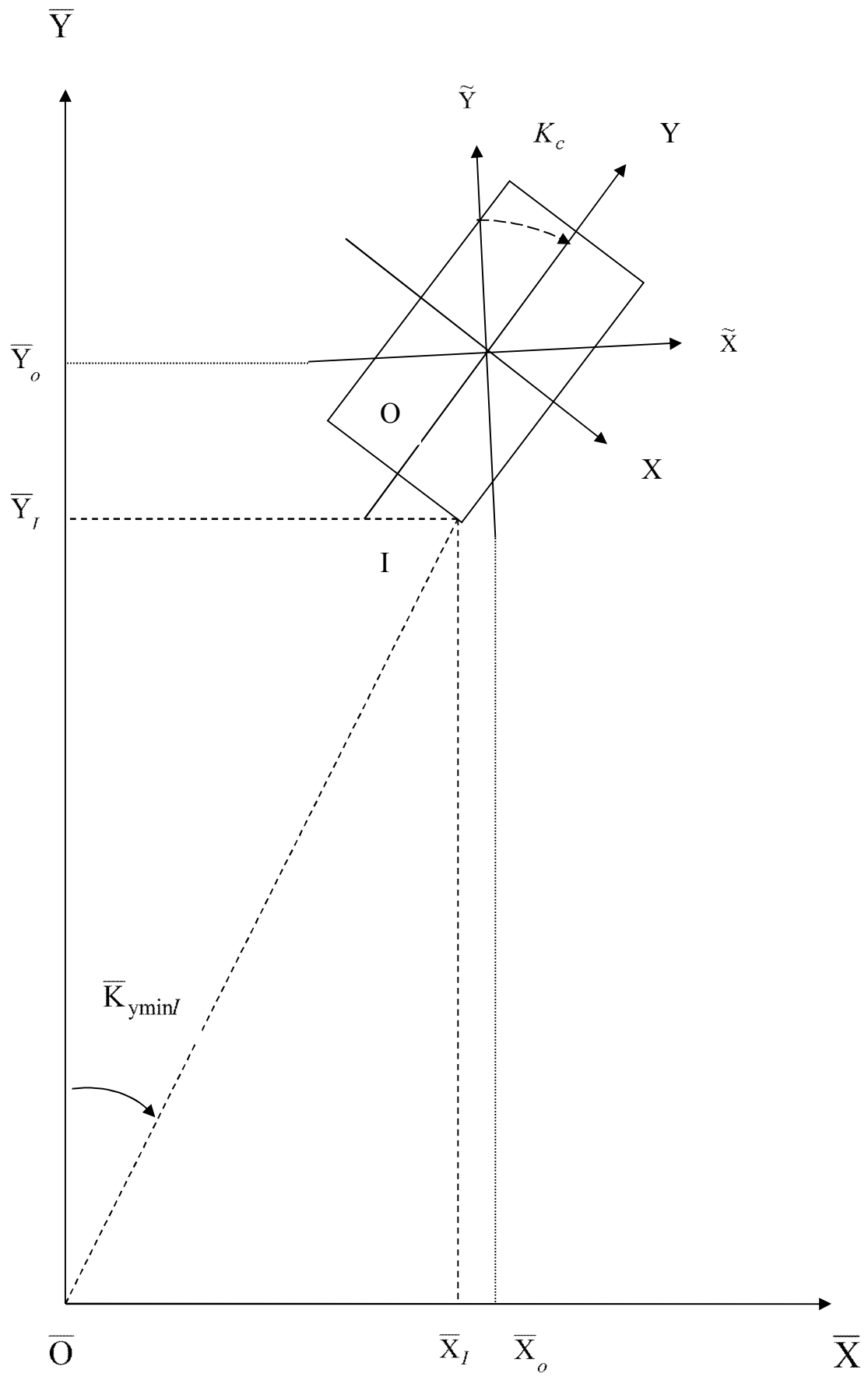


Рис. Г.8. До визначення мінімального курсу ухилення $\bar{K}_{yminI}$

$$\begin{aligned}\tilde{K}_{yminI} &= 360 + \bar{K}_{yminI}, \text{ при } \bar{Y}_I > 0; (I = A, B, C, D) \\ \tilde{K}_{yminI} &= 180 + \bar{K}_{yminI}, \text{ при } \bar{Y}_I < 0,\end{aligned}\quad (\Gamma.11)$$

де $\bar{K}_{yminI}$ визначається наступним чином:

$$\begin{aligned}\bar{K}_{yminA} &= \arctg \frac{\bar{X}_o + D_n \sin(\psi_n + K_c)}{\bar{Y}_o + D_n \cos(\psi_n + K_c)}, \\ \bar{K}_{yminB} &= \arctg \frac{\bar{X}_o + D_k \sin(\pi - \psi_k + K_c)}{\bar{Y}_o + D_k \cos(\pi - \psi_k + K_c)}, \\ \bar{K}_{yminC} &= \arctg \frac{\bar{X}_o + D_k \sin(\pi + \psi_k + K_c)}{\bar{Y}_o + D_k \cos(\pi + \psi_k + K_c)}, \\ \bar{K}_{yminD} &= \arctg \frac{\bar{X}_o + D_n \sin(2\pi - \psi_n + K_c)}{\bar{Y}_o + D_n \cos(2\pi - \psi_n + K_c)}.\end{aligned}$$

Використовуючи отримані вирази, за допомогою формули (Г.11) знаходимо значення відносних мінімальних курсів ухилення $\tilde{K}_{yminA}$, $\tilde{K}_{yminB}$, $\tilde{K}_{yminC}$, $\tilde{K}_{yminD}$. Для вибору граничних відносних курсів ухилення K_{ot}^s та K_{ot}^p скористаємося наступними співвідношеннями:

$$\begin{aligned}K_{ot}^s &= \max \{ \tilde{K}_{yminA}, \tilde{K}_{yminB}, \tilde{K}_{yminC}, \tilde{K}_{yminD} \}. \\ K_{ot}^p &= \min \{ \tilde{K}_{yminA}, \tilde{K}_{yminB}, \tilde{K}_{yminC}, \tilde{K}_{yminD} \}.\end{aligned}$$

Г.4. Додаткові маневри розходження для ситуації в разі $V_1 > V_2$.

Вибір маневру розходження відносним ухиленням вліво показаний на рис. Г.9, який відповідає точці на нижній межі області S_{Dij} . Аналіз коректності маневру підтверджений рис. Г.10, де лінія відносного курсу також є дотичною до еліптичного домену.

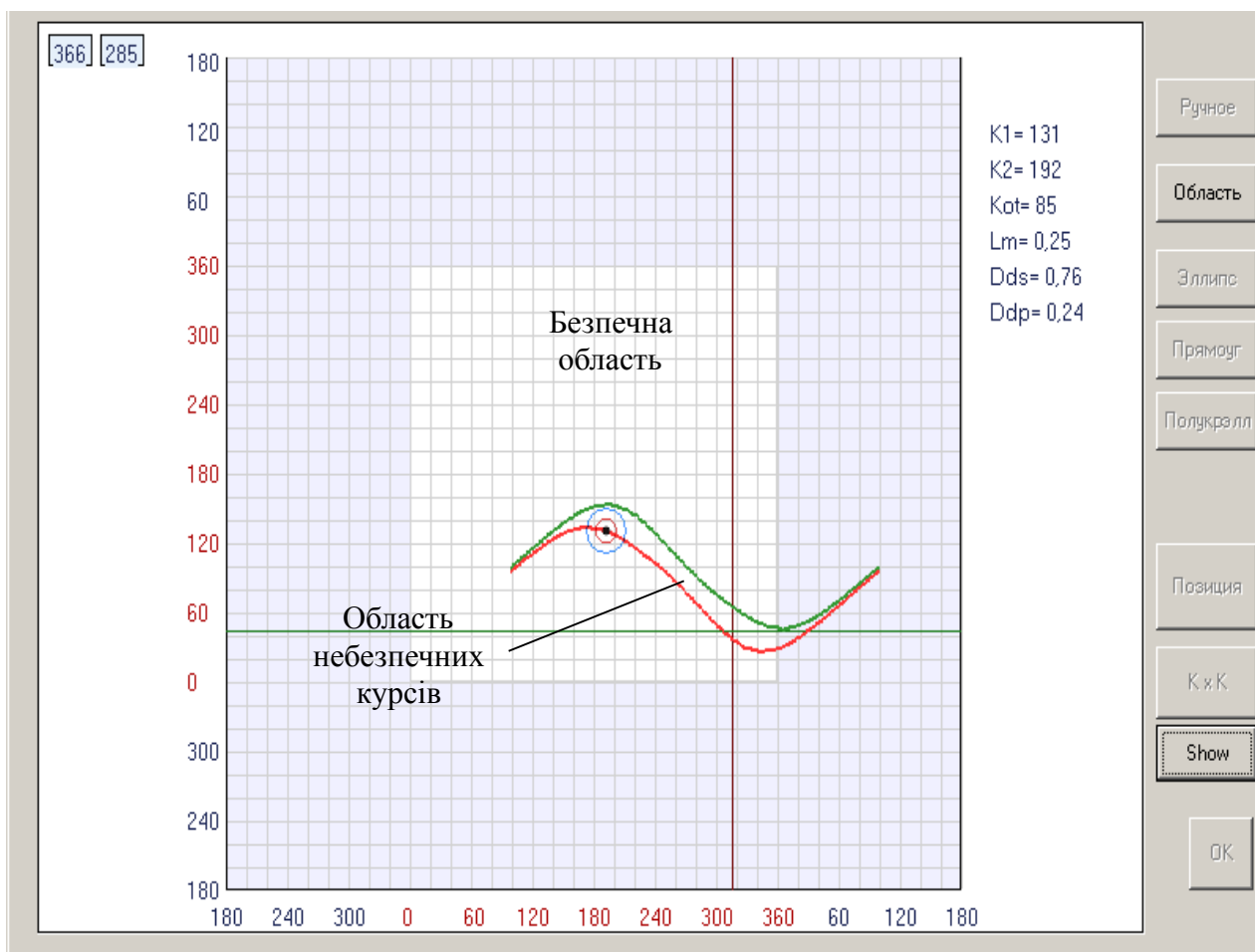


Рис. Г.9. Вибір маневру розходження відносним ухиленням вліво

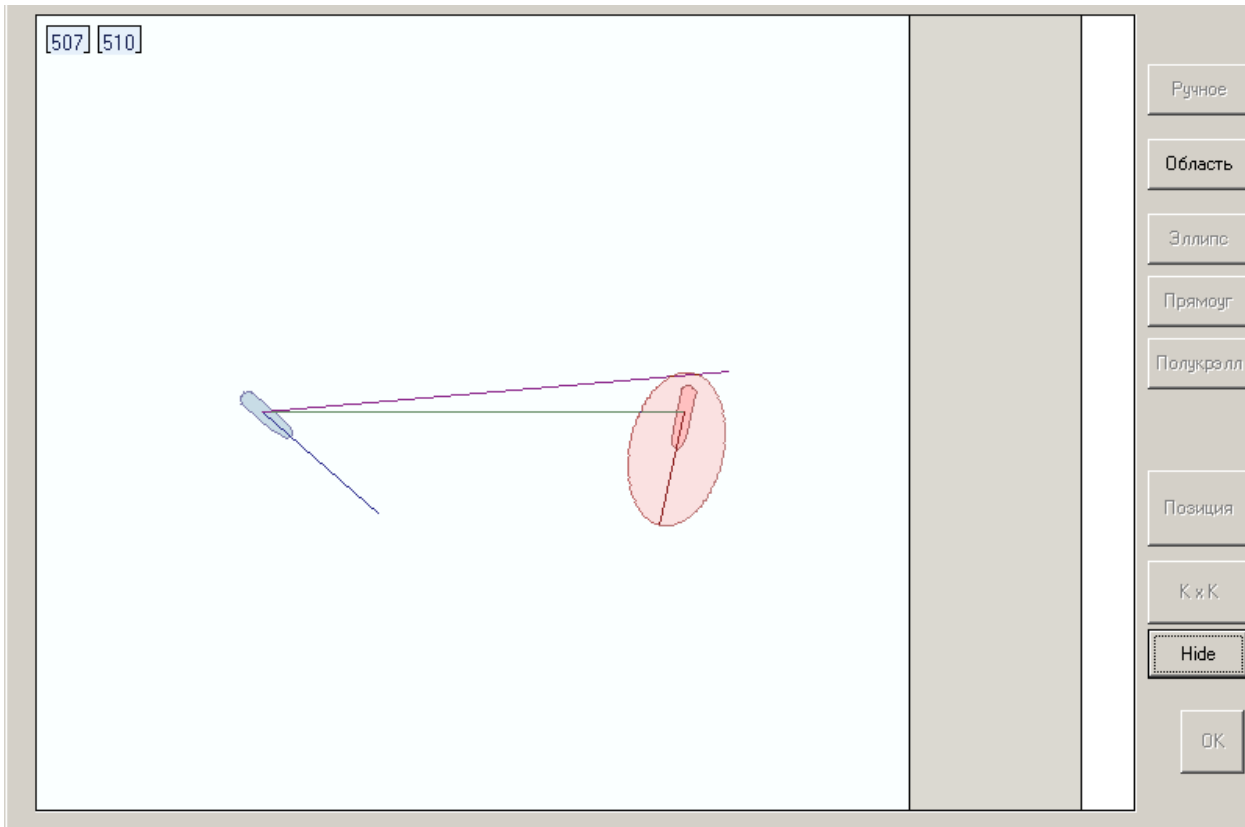


Рис. Г.10. Аналіз маневру розходження відносним ухиленням вліво

Вибір маневру відносного ухилення вправо при повороті першого судна вліво наведено на рис. Г.11, при цьому друге судно незначно збільшує свій курс. Аналіз коректності цього маневру розходження підтверджений рис. Г.12. Поворот обох суден вліво з відносним ухиленням вліво характеризує маневр розходження, вибір якого на нижній межі області S_{Dij} представлений на рис. Г.13, а на рис. Г.14 показаний результат перевірки коректності обраного маневру. На рис. Г.15 представлений вибір маневру розходження на зустрічних курсах суден відносним ухиленням вправо (верхня межа області S_{Dij}) при повороті обох суден вліво. Коректність маневру підтверджена рис. Г.16. Вибір маневру розходження на зустрічних курсах суден відносним ухиленням вліво за допомогою нижньої межі області S_{Dij} показаний на рис. Г.17, а підтвердження коректності обраного маневру розходження суден на зустрічних курсах наведено на рис. Г.18.

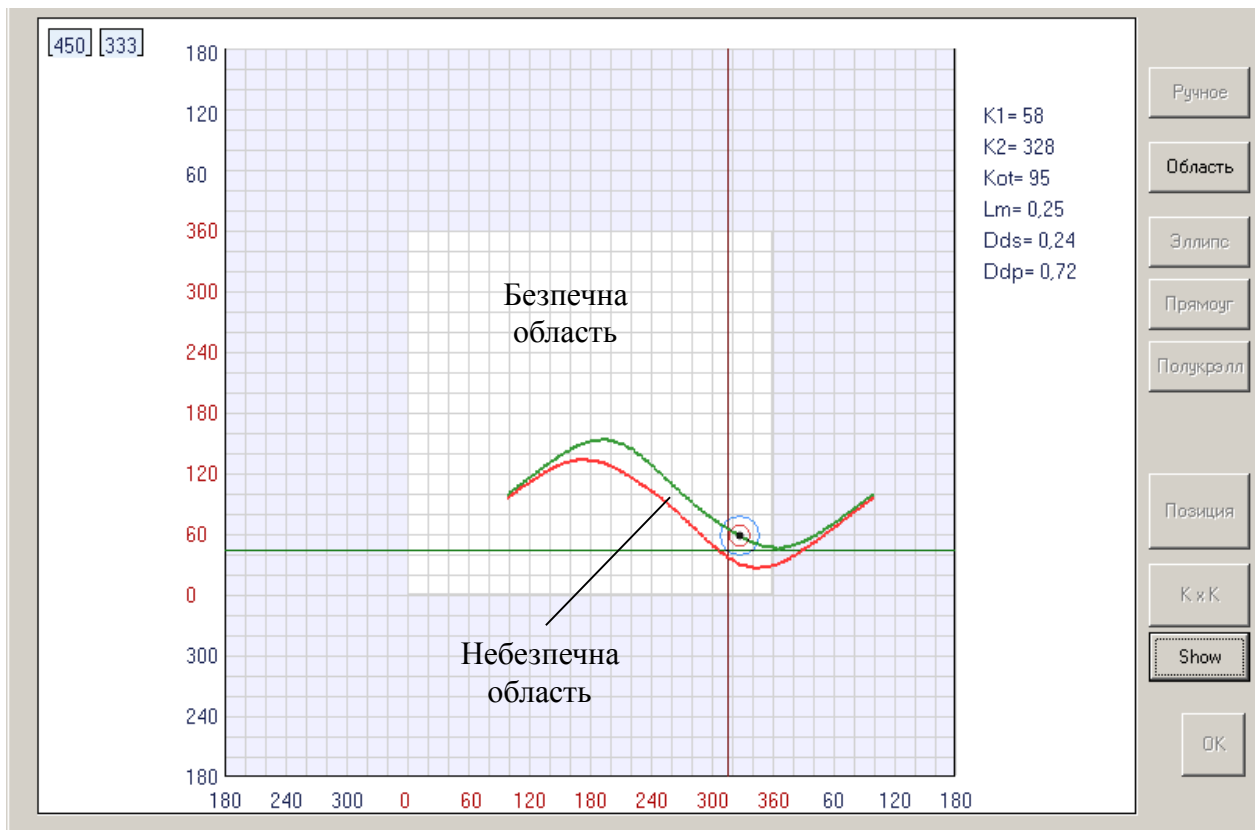


Рис. Г.11. Вибір маневру розходження відносним ухиленням вправо

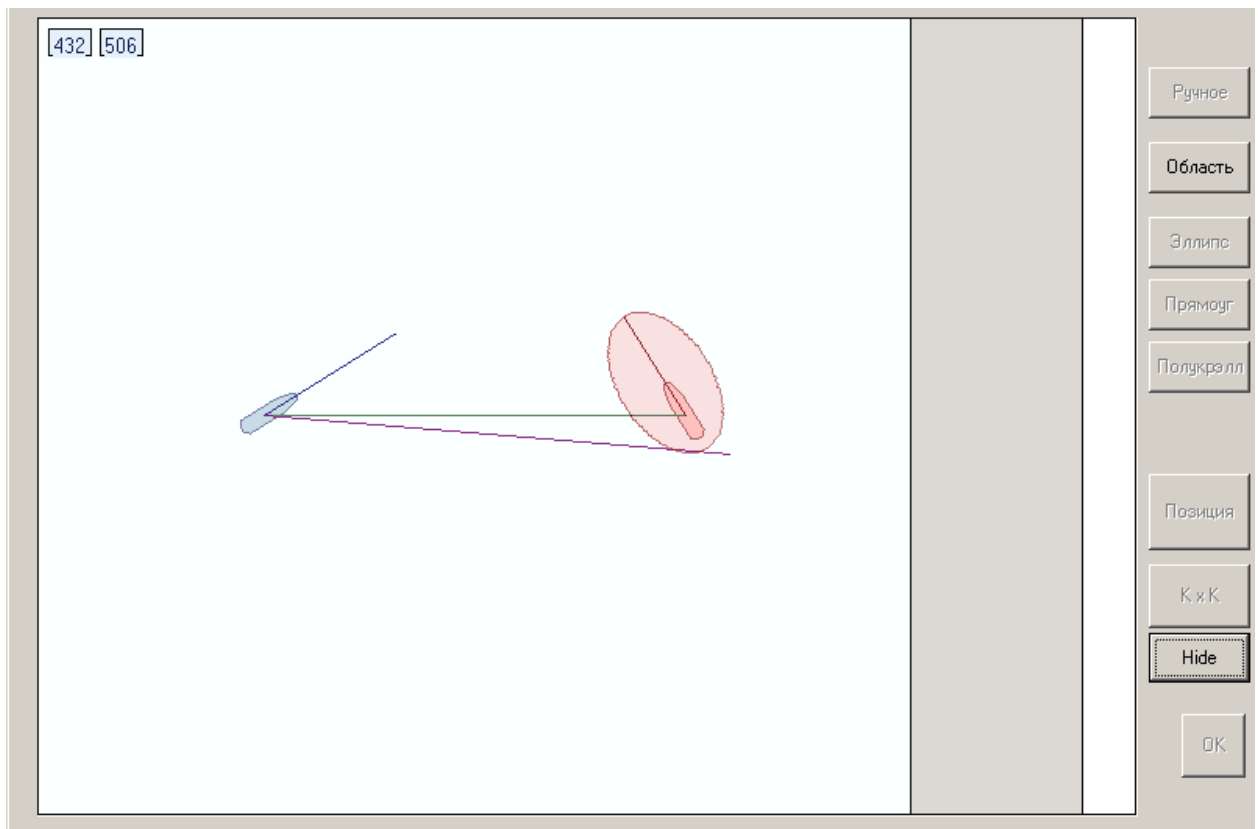


Рис. Г.12. Коректність маневру розходження ухиленням вправо

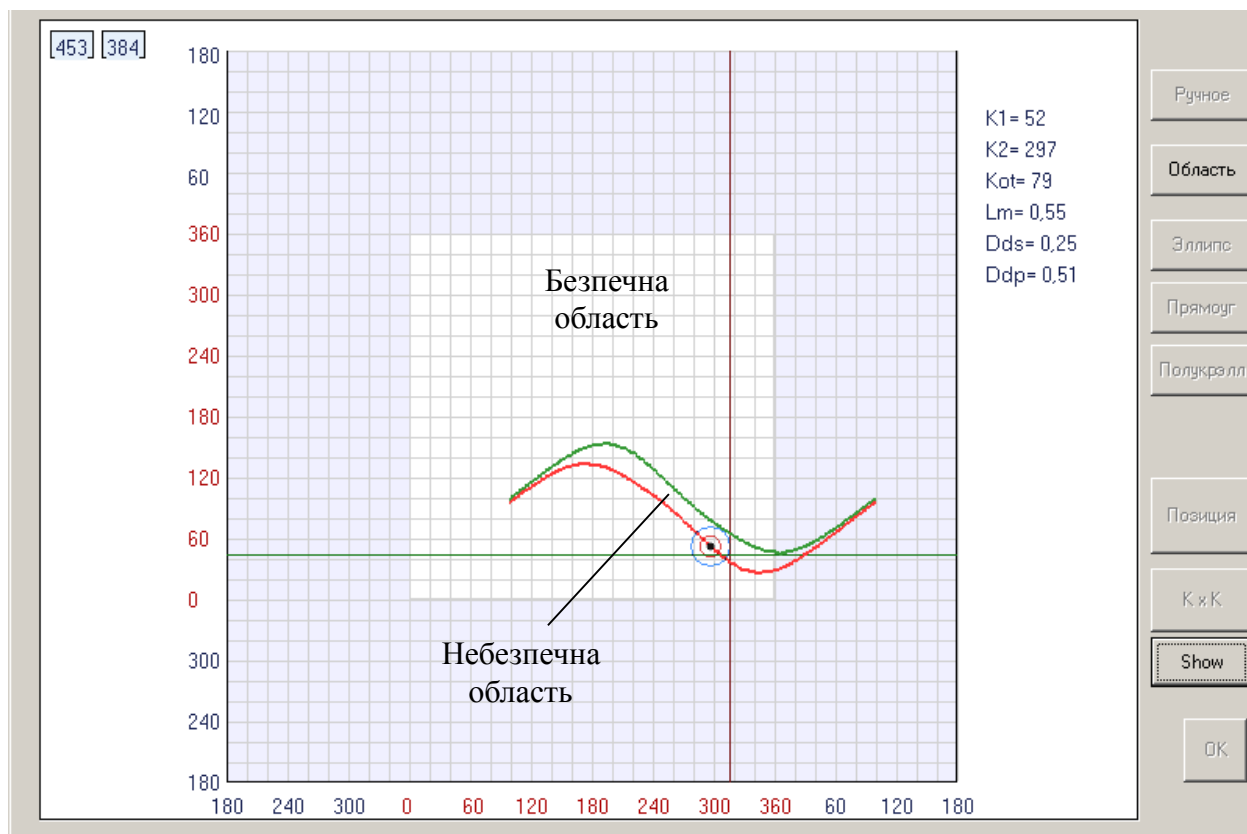


Рис. Г.13. Вибір маневру розходження поворотом обох суден вліво

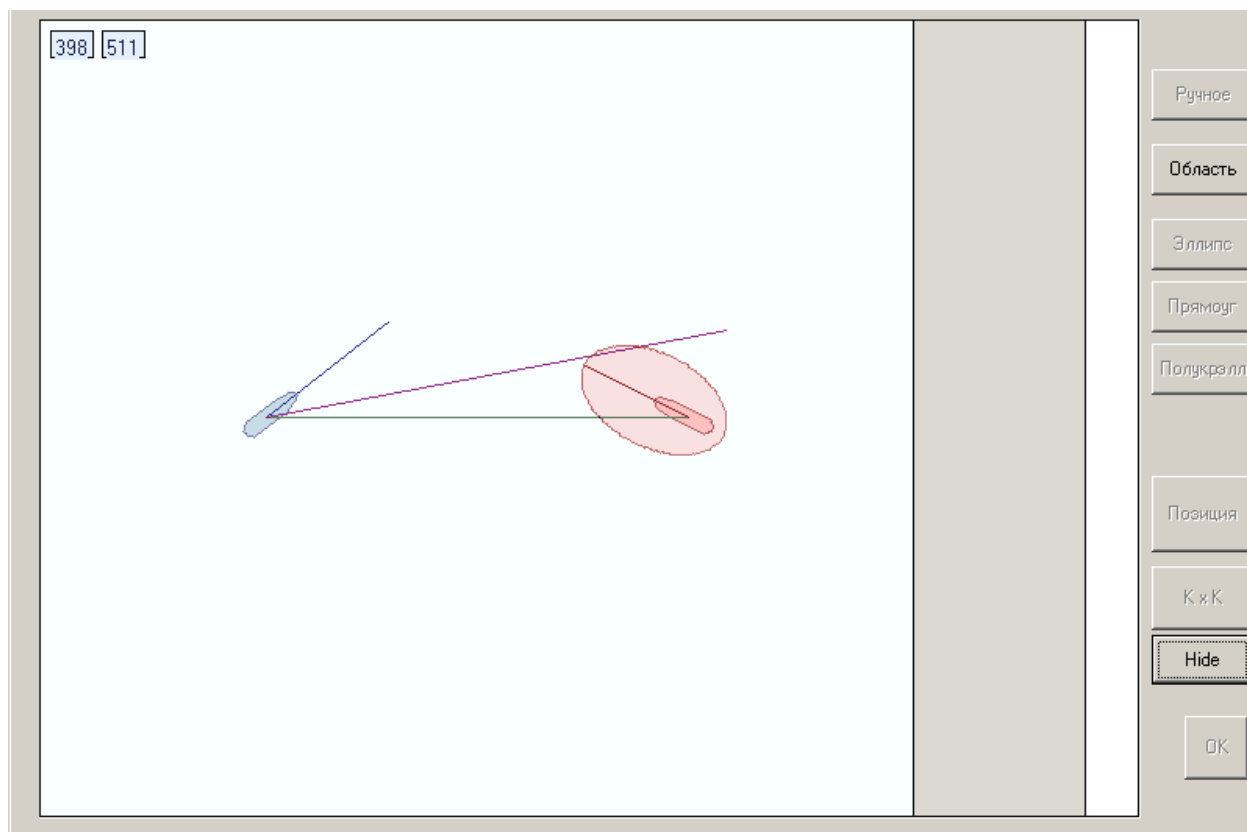


Рис. Г.14. Результат перевірки коректності маневру розходження

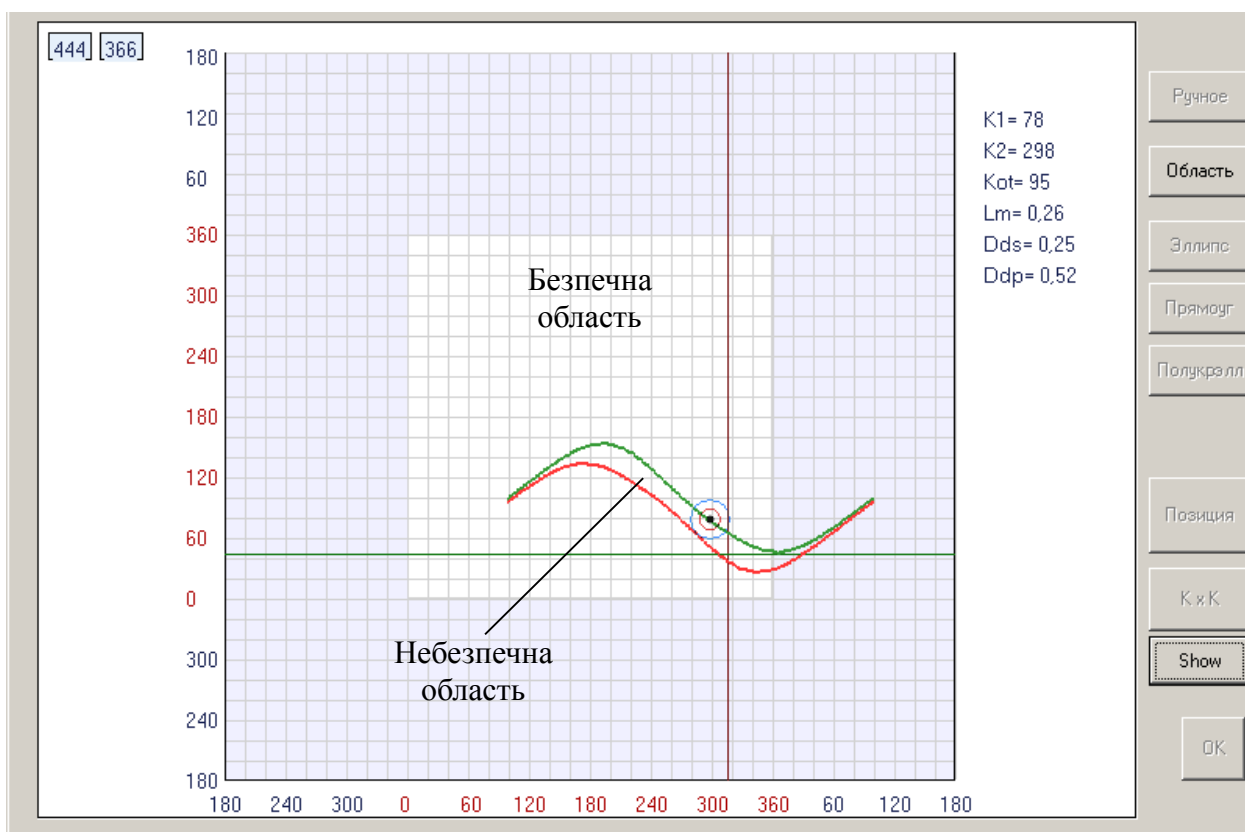


Рис. Г.15. Вибір маневру розходження на зустрічних курсах суден

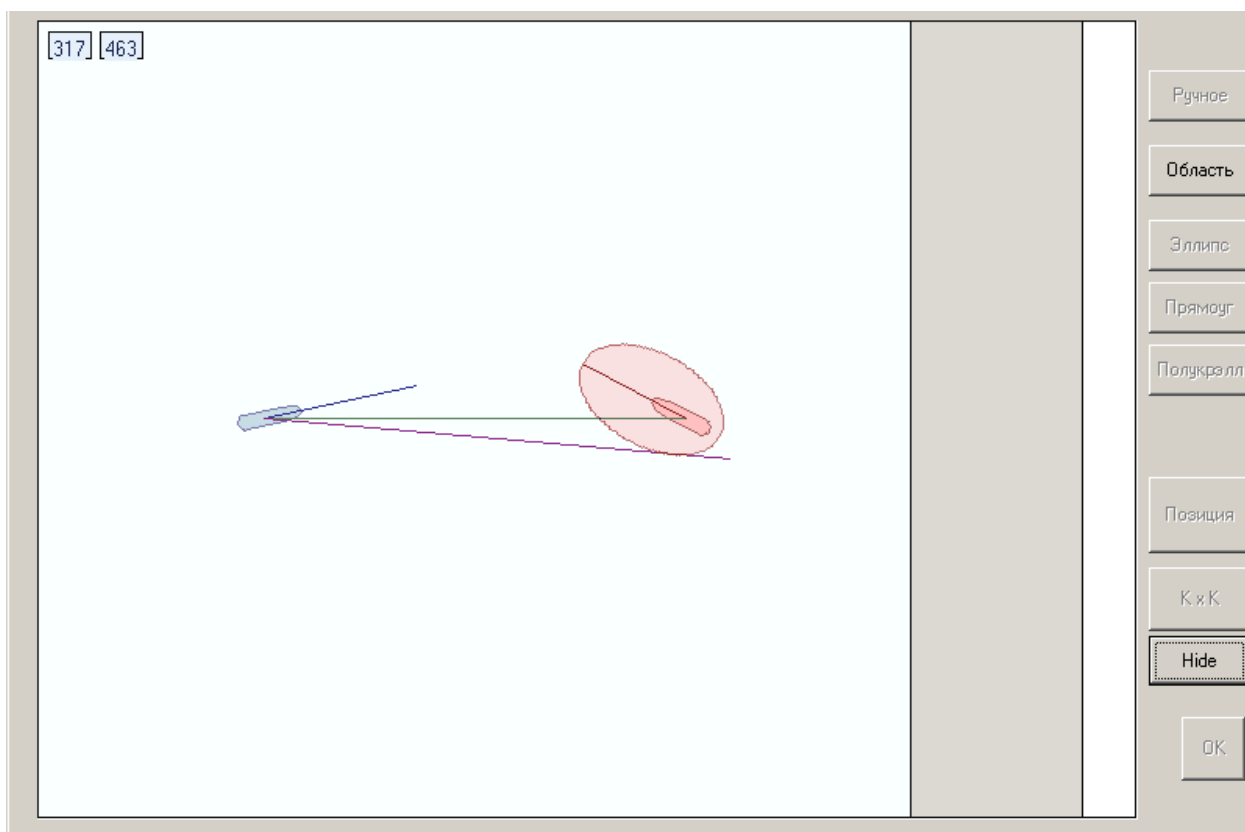


Рис. Г.16. Підтвердження коректності маневру

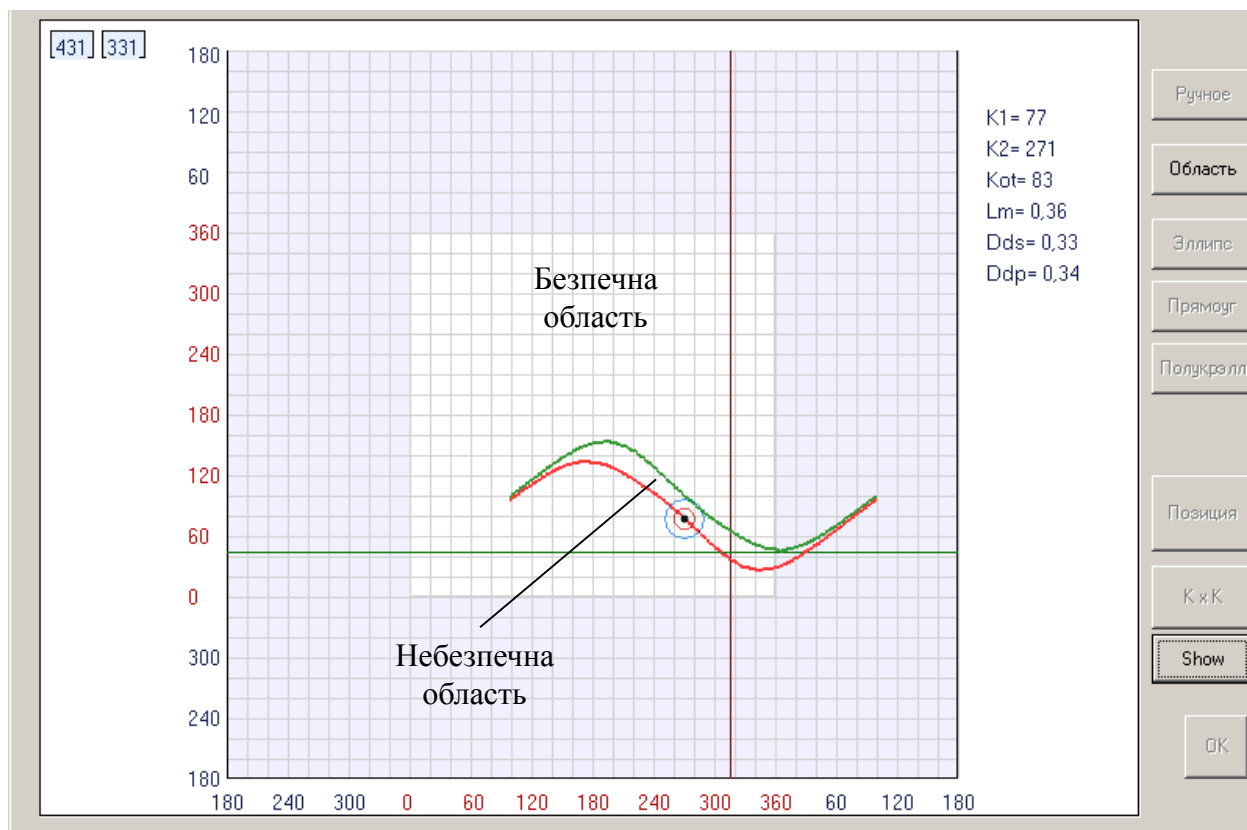


Рис. Г.17. Вибір маневру на зустрічних курсах суден ухиленням вліво

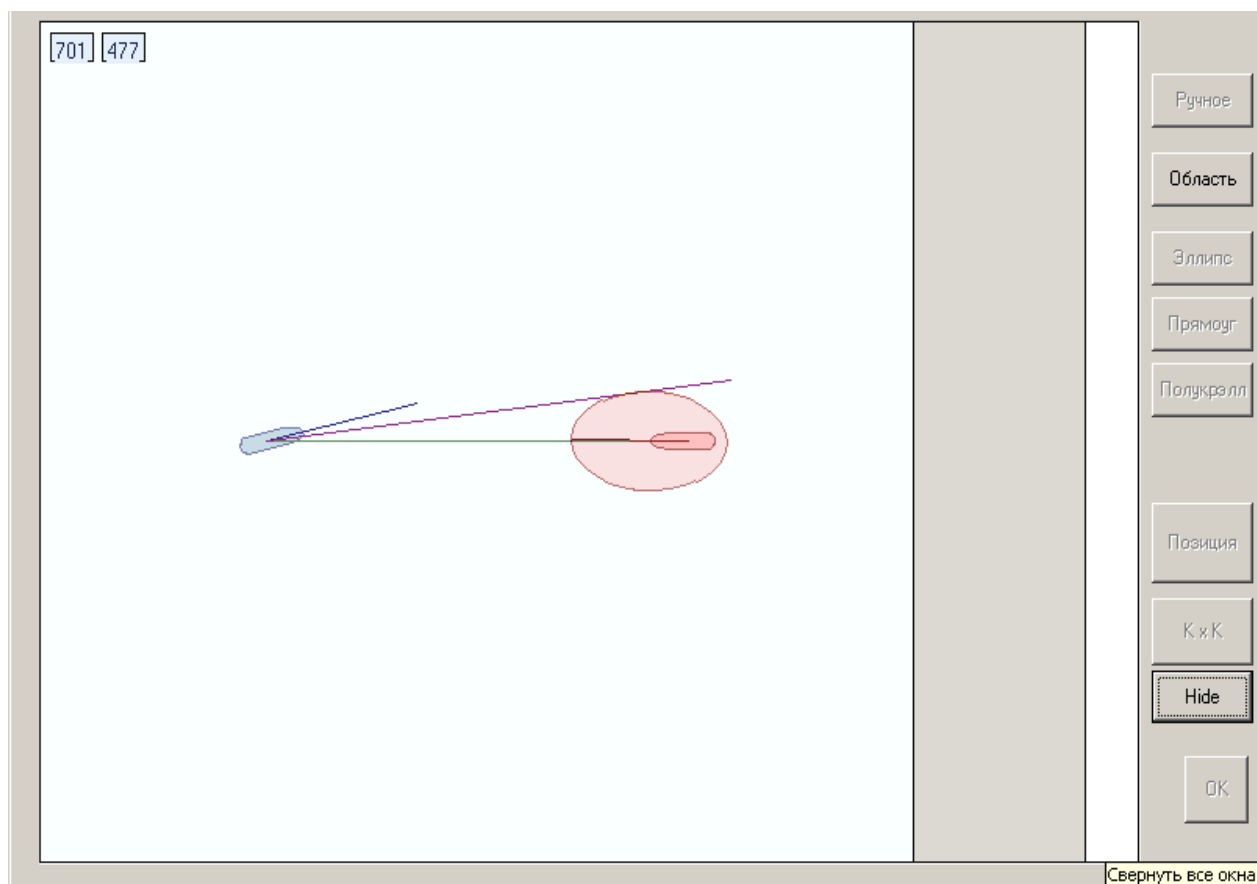


Рис. Г.18. Підтвердження коректності маневру ухиленням вліво

Г.5. Додаткові маневри розходження для ситуації при $V_1 = V_2$.

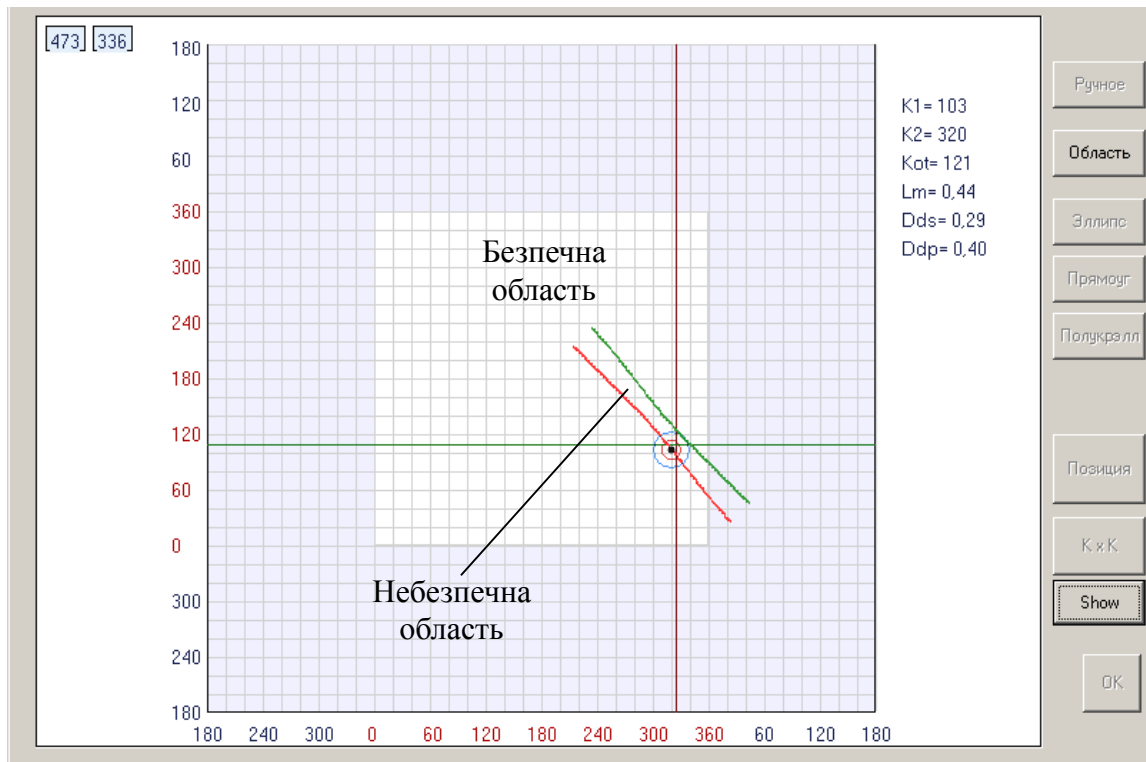


Рис. Г.19. Вибір маневру розходження відносним ухиленням вліво

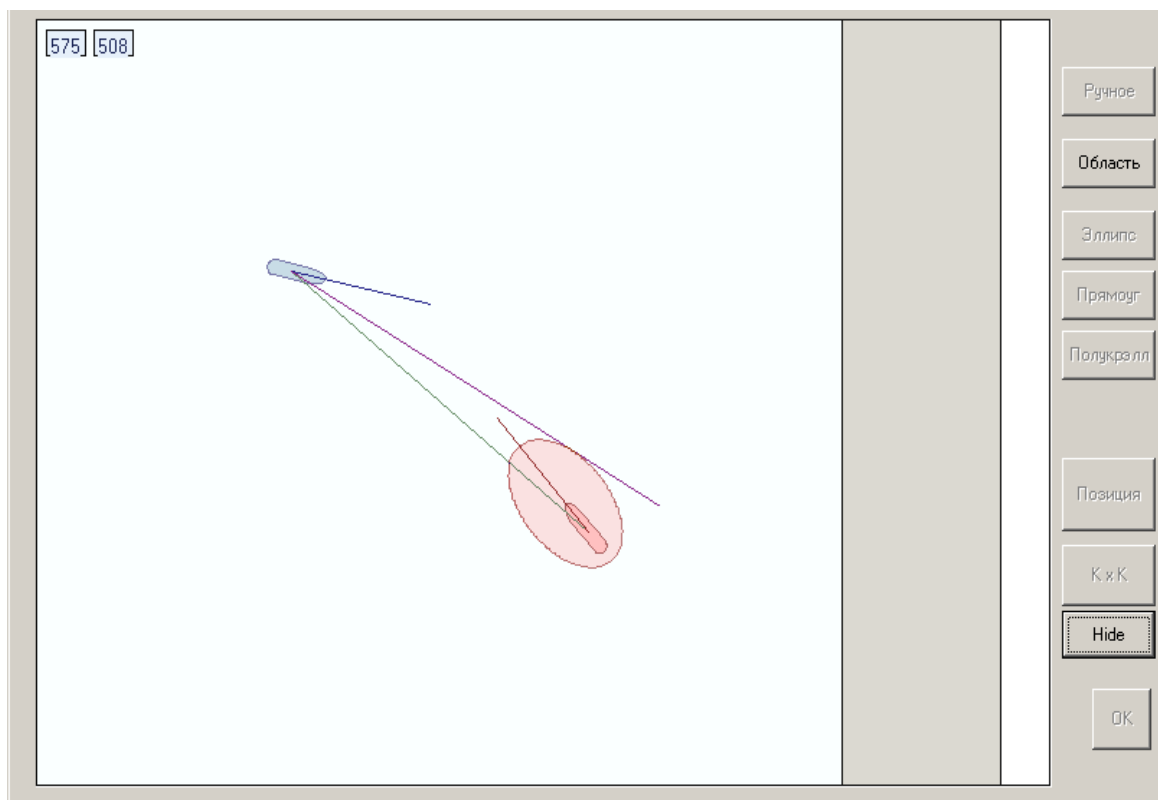


Рис. Г.20. Підтвердження коректності маневру ухиленням вліво

На рис. Г.21 показаний вибір маневру розходження збільшенням курсу першого судна $K_1 = 203^\circ$ і зменшенням курсу другого судна $K_2 = 263^\circ$, що викликає відносне ухилення вправо і рівність дистанцій L_m та D_{ds} . Результати перевірки коректності обраного маневру розходження представлені на рис. Г.22. Вибір маневру розходження зменшенням курсу першого судна до значення $K_1 = 43^\circ$ і збільшенням курсу другого судна до значення $K_2 = 9^\circ$ показано на рис. Г.23, що веде до відносного ухилення вліво, причому досягається рівність дистанцій L_m та D_{dp} . На рис. Г.24 представлені результати перевірки коректності обраного маневру розходження.

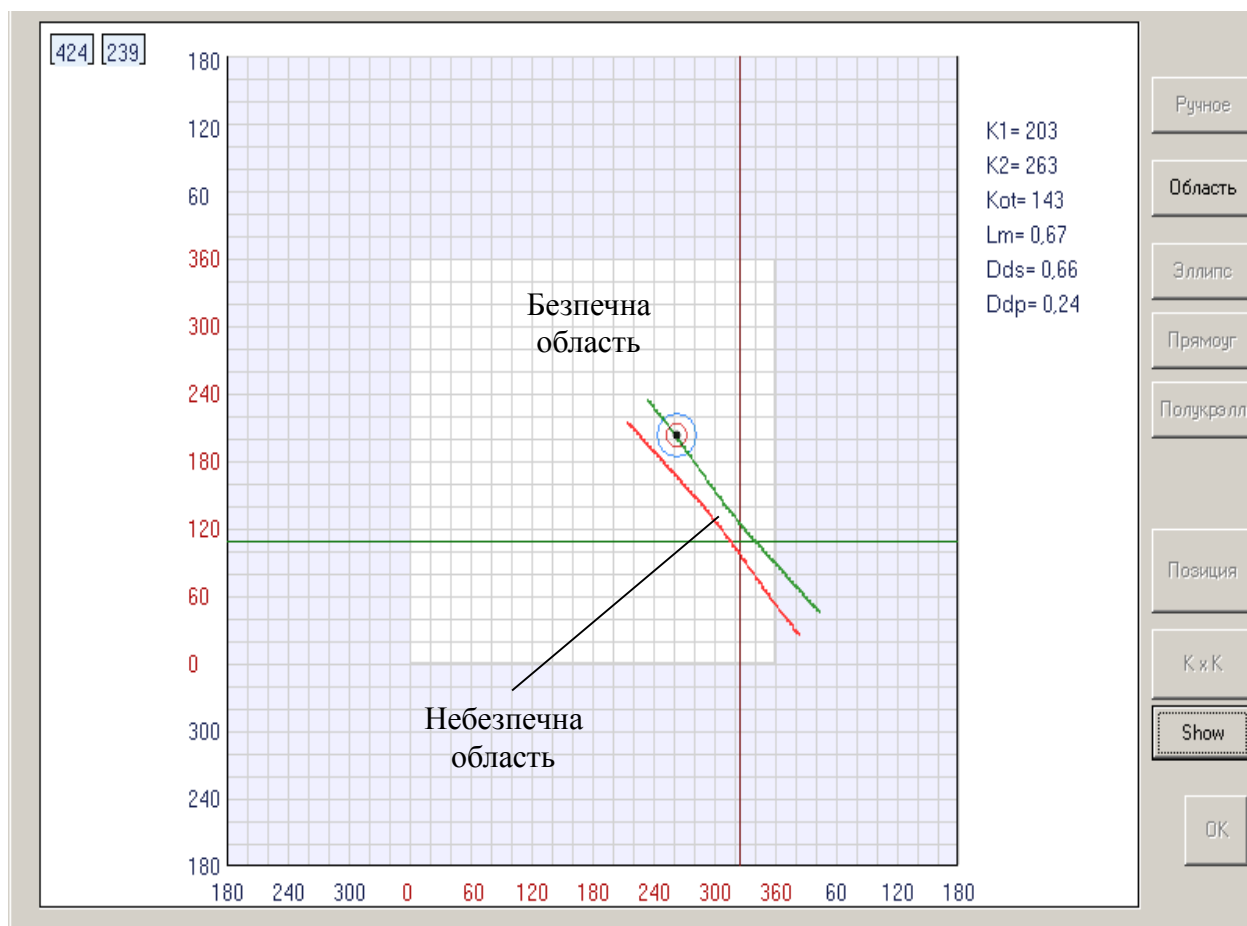


Рис. Г.21. Вибір маневру розходження відносним ухиленням вправо

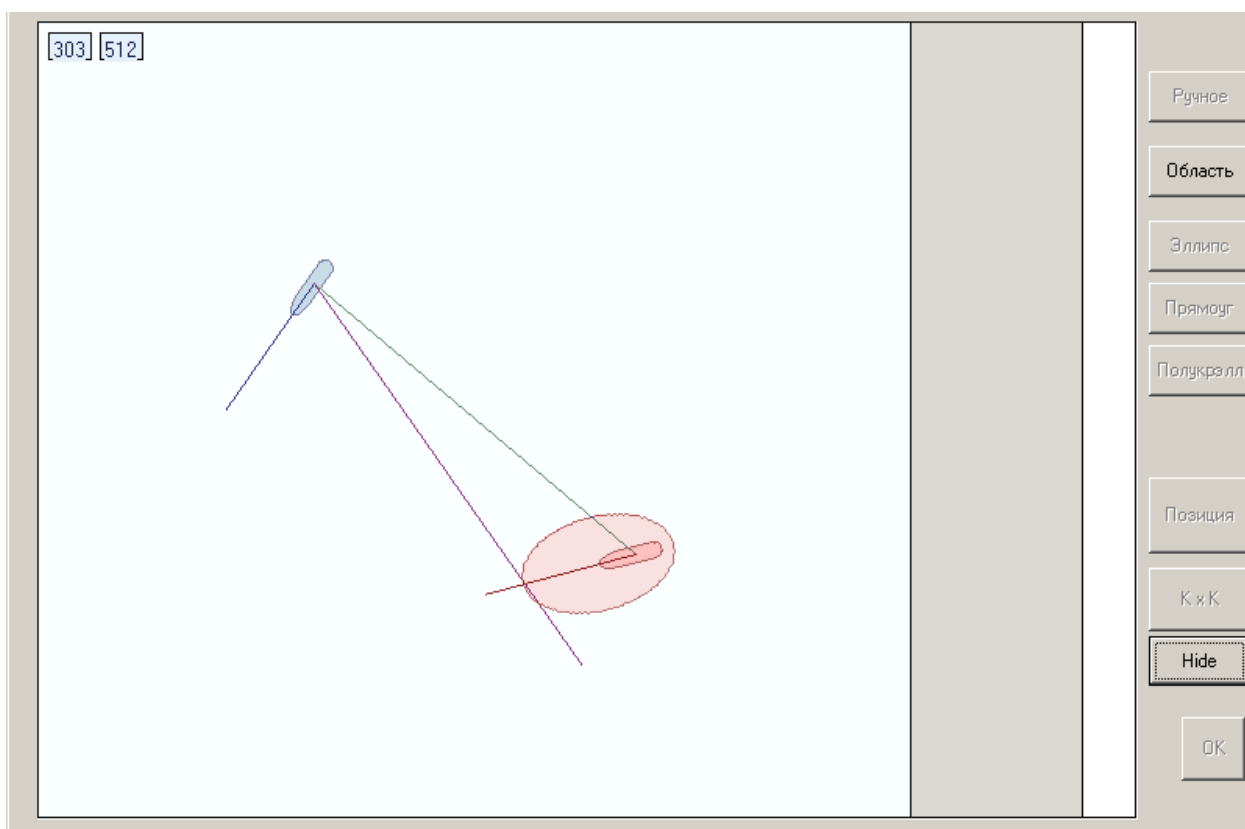


Рис. Г.22. Результати перевірки коректності маневру ухиленням вправо

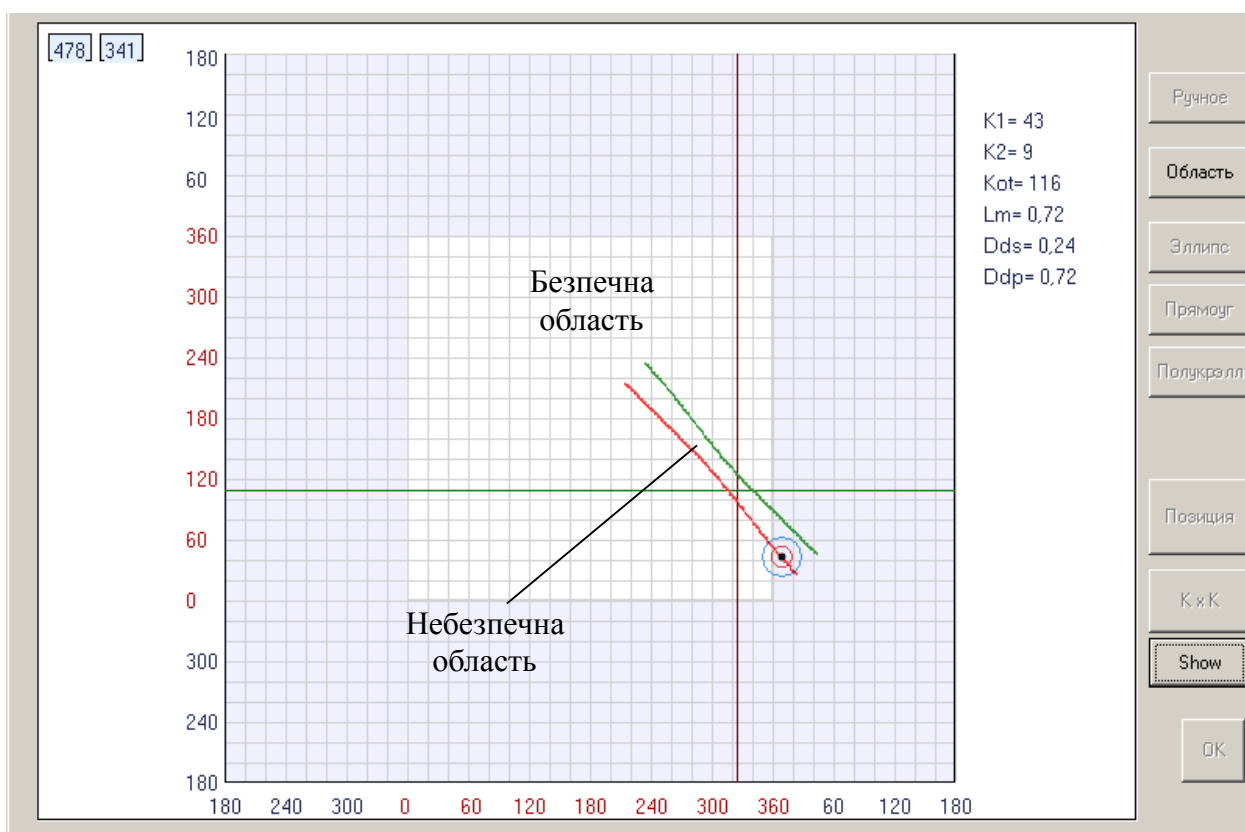


Рис. Г.23. Вибір маневру розходження відносним ухиленням вліво

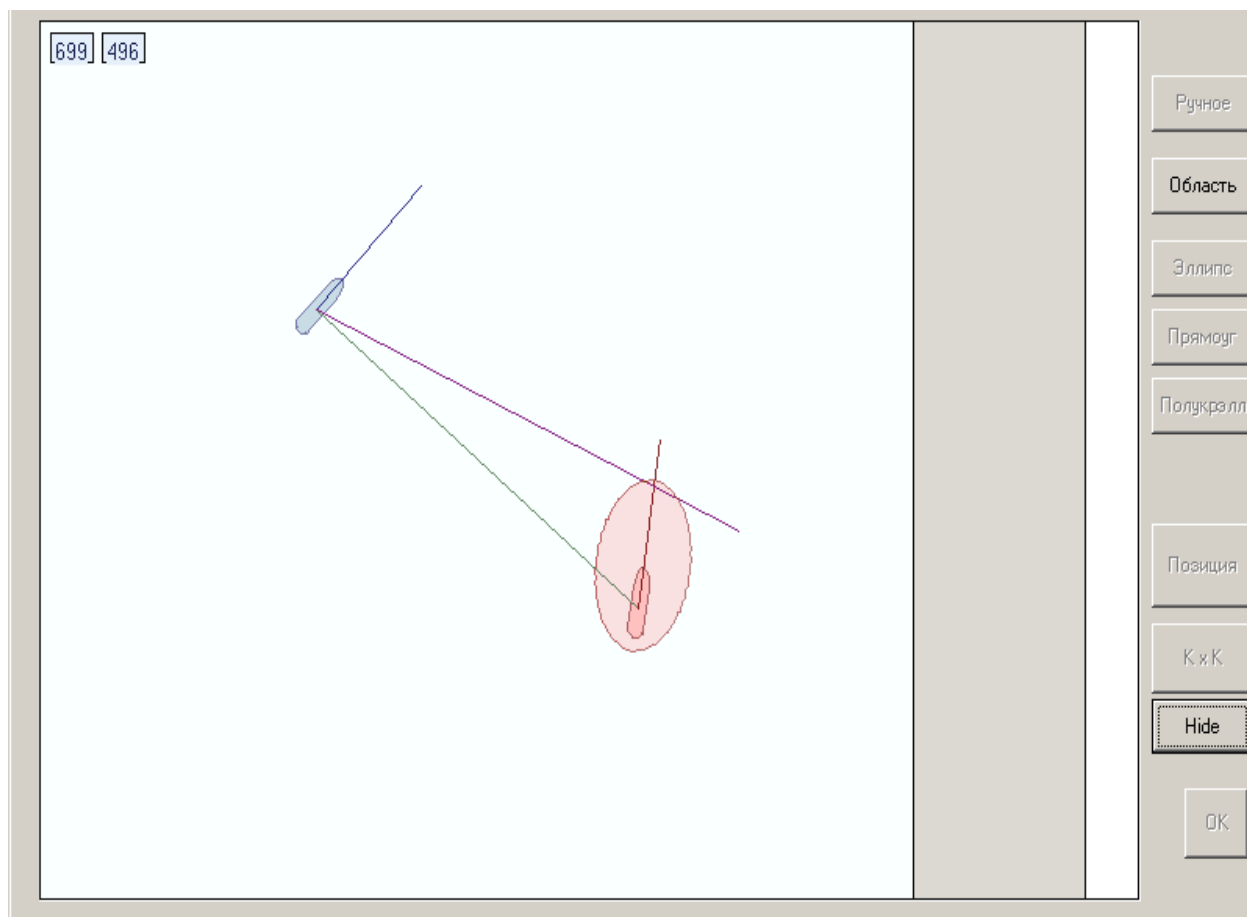


Рис. Г.24. Підтвердження коректності маневру ухиленням вліво

При перевірці правильності маневрів розходження відносними відхиленнями вправо (рис. Г.22) і вліво (рис. Г.24) лінія відносного курсу є дотичною до еліптичного домену, що свідчить про рівність дистанції найкоротшого зближення з гранично допустимою дистанцією зближення.

Г.6. Додаткові маневри розходження для ситуації в разі $V_1 > V_2$ для домену прямокутної форми.

На рис. Г.25 показаний вибір безпечного маневру розходження відносним ухиленням вліво мінімальним зменшенням курсів суден, а на рис. Г.26 підтверджений позитивний результат перевірки коректності маневру відносним ухиленням вліво.

Вибір безпечного маневру розходження відносним ухиленням вправо зменшенням курсу першого судна і збільшенням курсу другого судна представлений на рис. Г.27, а на рис. Г.28 показана коректність маневру відносним ухиленням вправо.

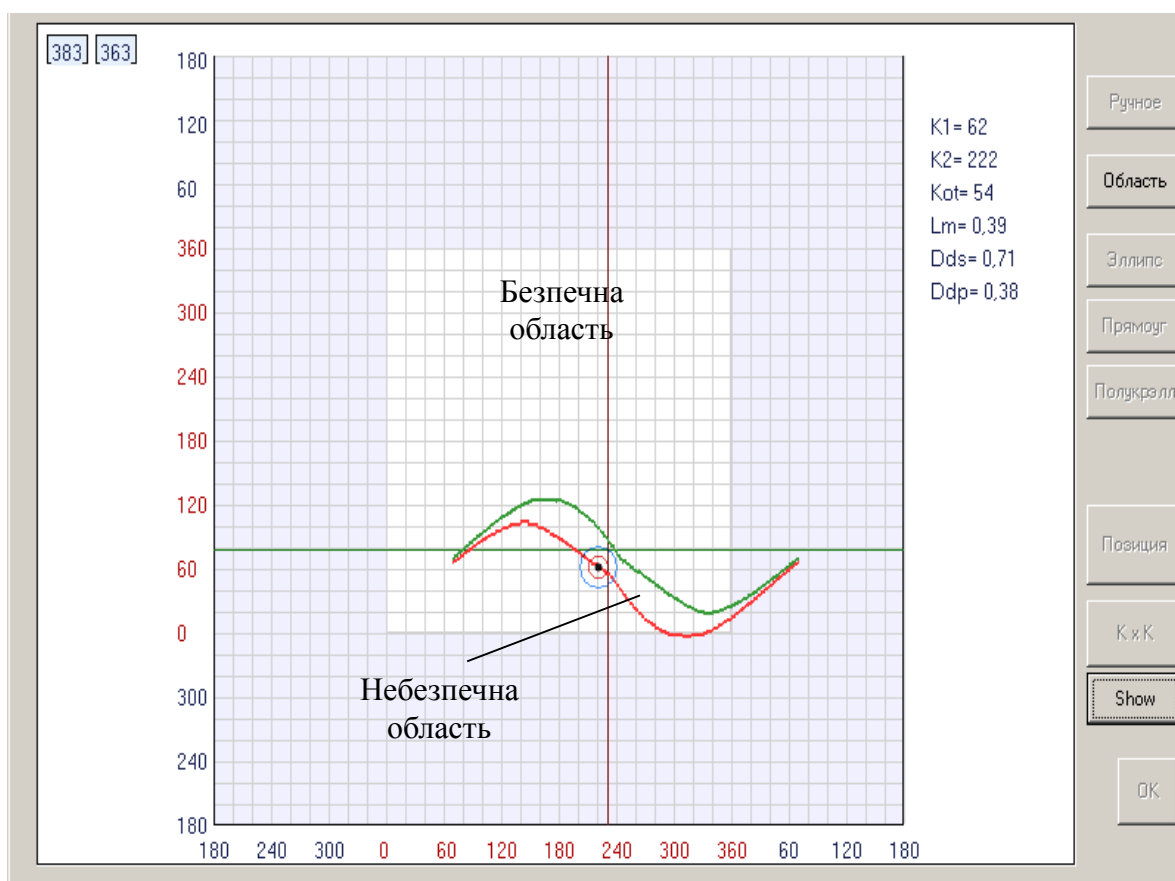


Рис. Г.25. Маневр розходження мінімальним ухиленням вліво

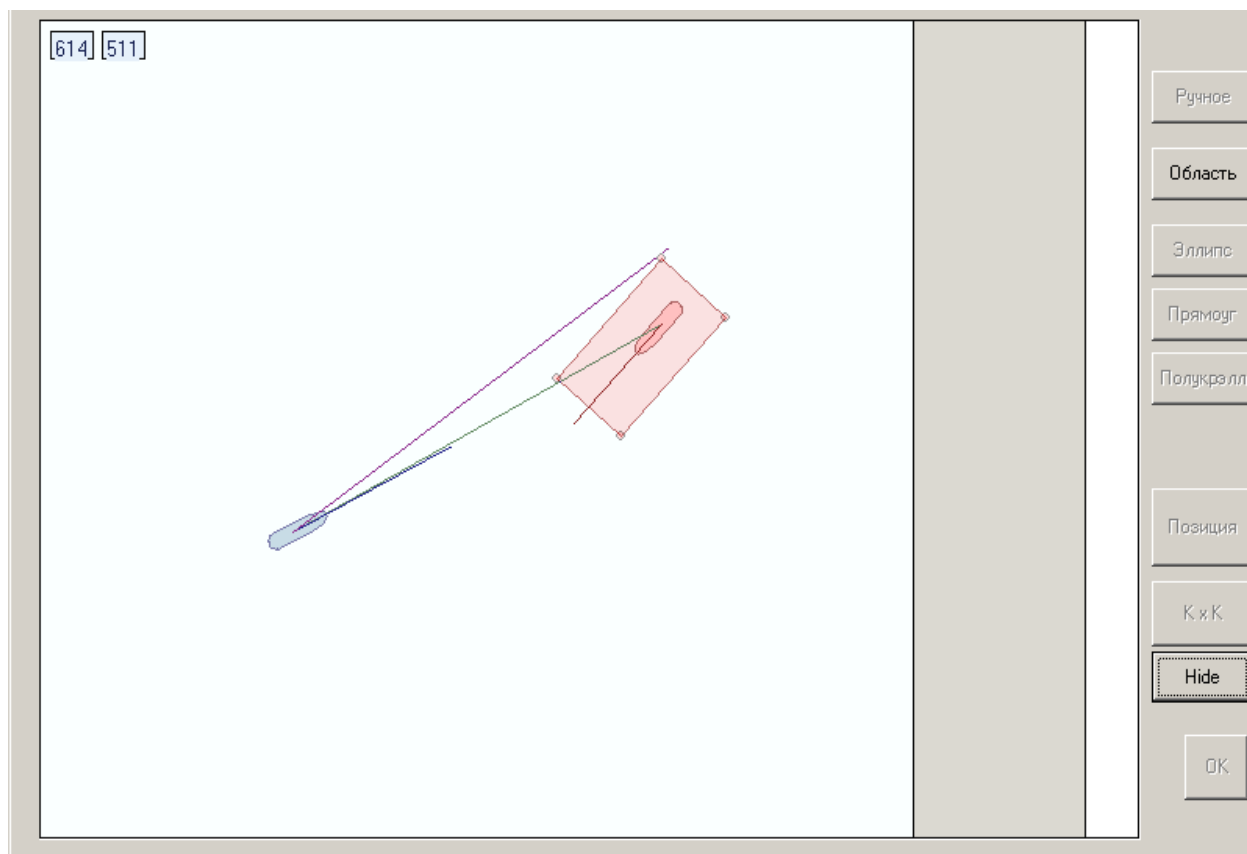


Рис. Г.26. Підтвердження коректності маневру ухиленням вліво

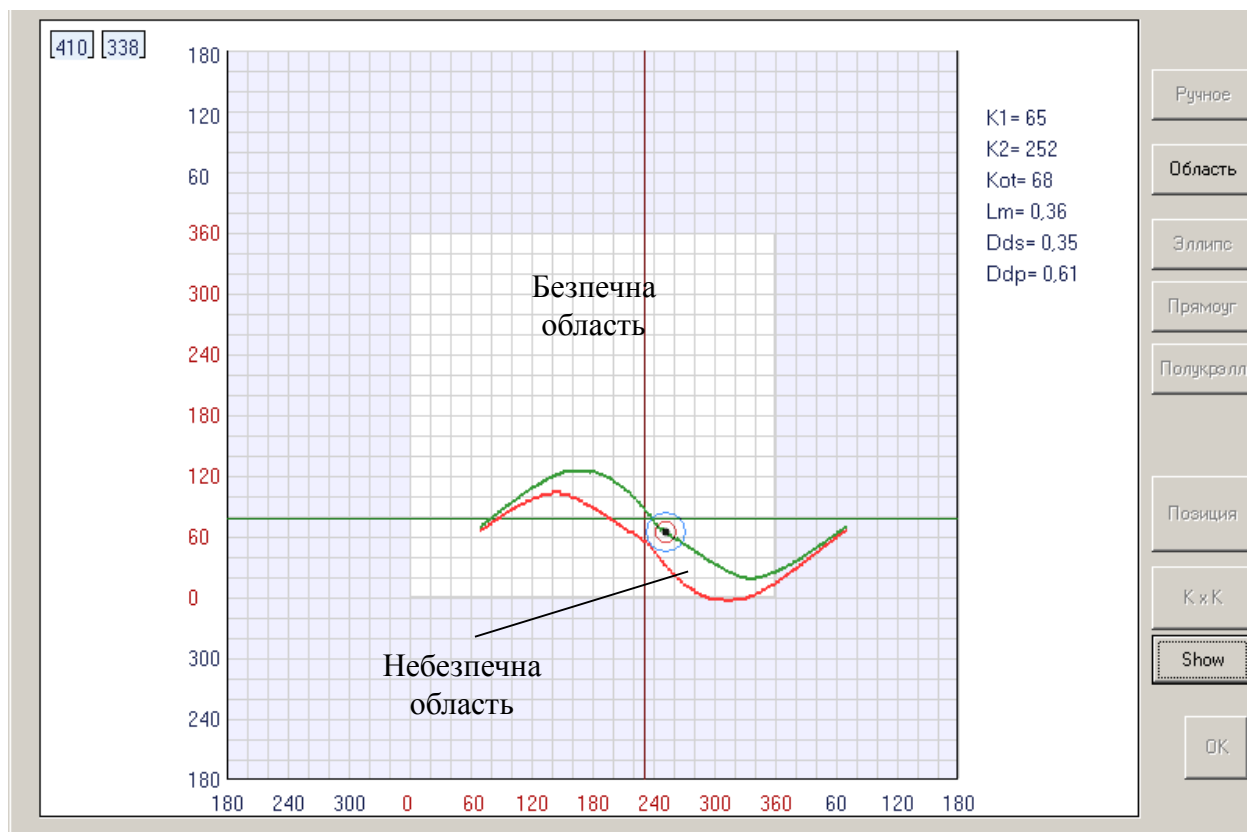


Рис. Г.27. Вибір маневру розходження ухиленням вправо

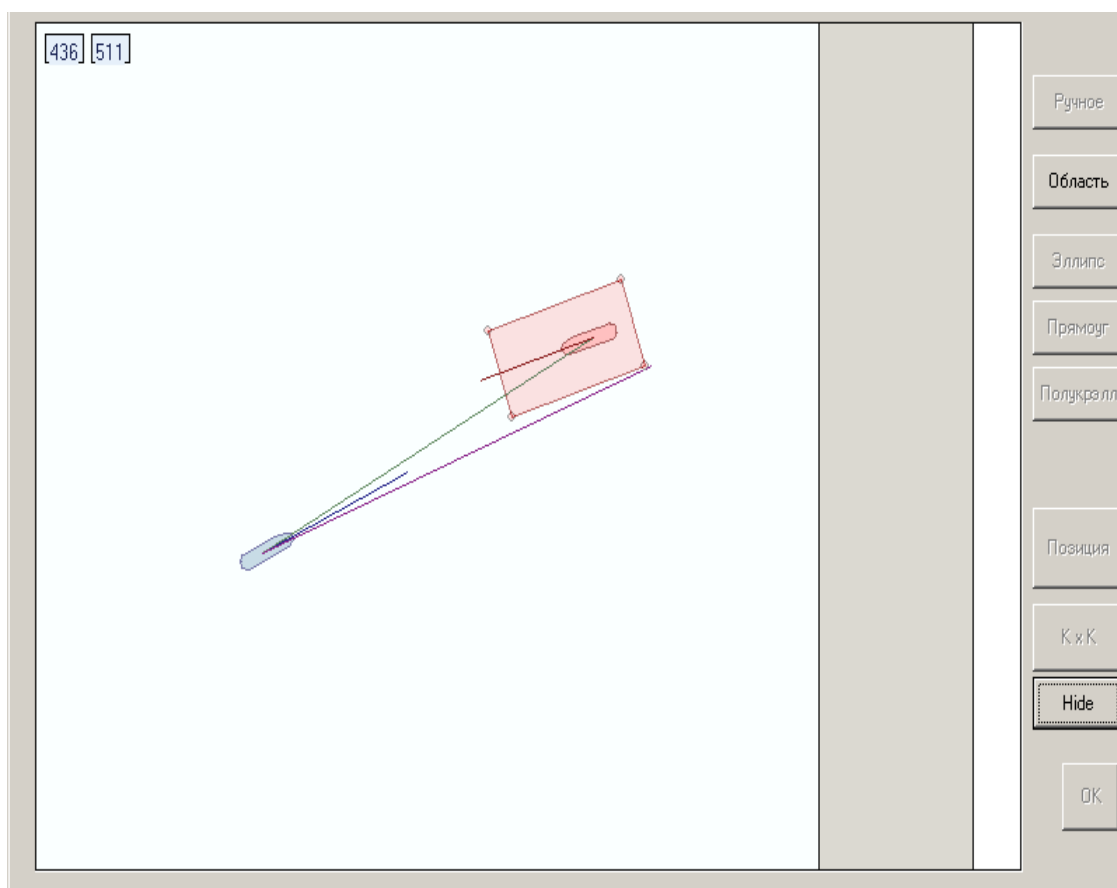


Рис. Г.28. Перевірка коректності маневру ухиленням вправо

На рис. Г.26 відносним ухиленням вліво і на рис. Г.28 відносним ухиленням вправо лінія відносного курсу проходить через крайню кутову точку прямокутного домену, що є свідченням рівності дистанції найкоротшого зближення і гранично допустимої дистанції зближення.

На рис. Г.29 показаний вибір безпечного маневру розходження відносним ухиленням вліво, коли проводиться зменшення істинного курсу першого судна елементарної групи і збільшення курсу другого судна групи до значень $K_1 = 43^\circ$ і збільшення курсу другого судна до значення $K_2 = 243^\circ$, причому дистанція найкоротшого зближення $L_m = 0,49$ милі, а гранично допустима дистанції зближення $D_{dp} = 0,48$ милі.

Коректність маневру відносним ухиленням вліво підтверджена на рис. Г.30, так як лінія відносного курсу проходить через крайню кутову точку прямокутного домену.

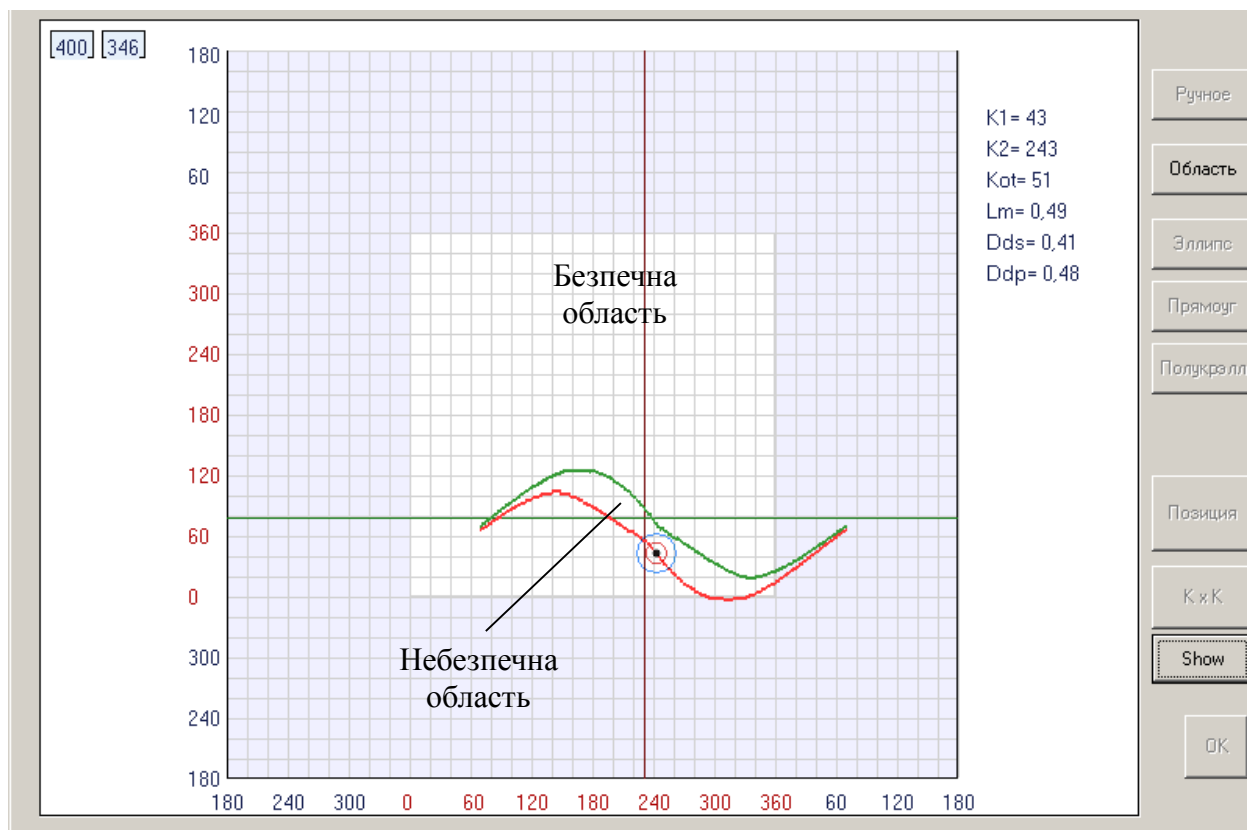


Рис. Г.29. Маневр розходження відносним ухиленням вліво

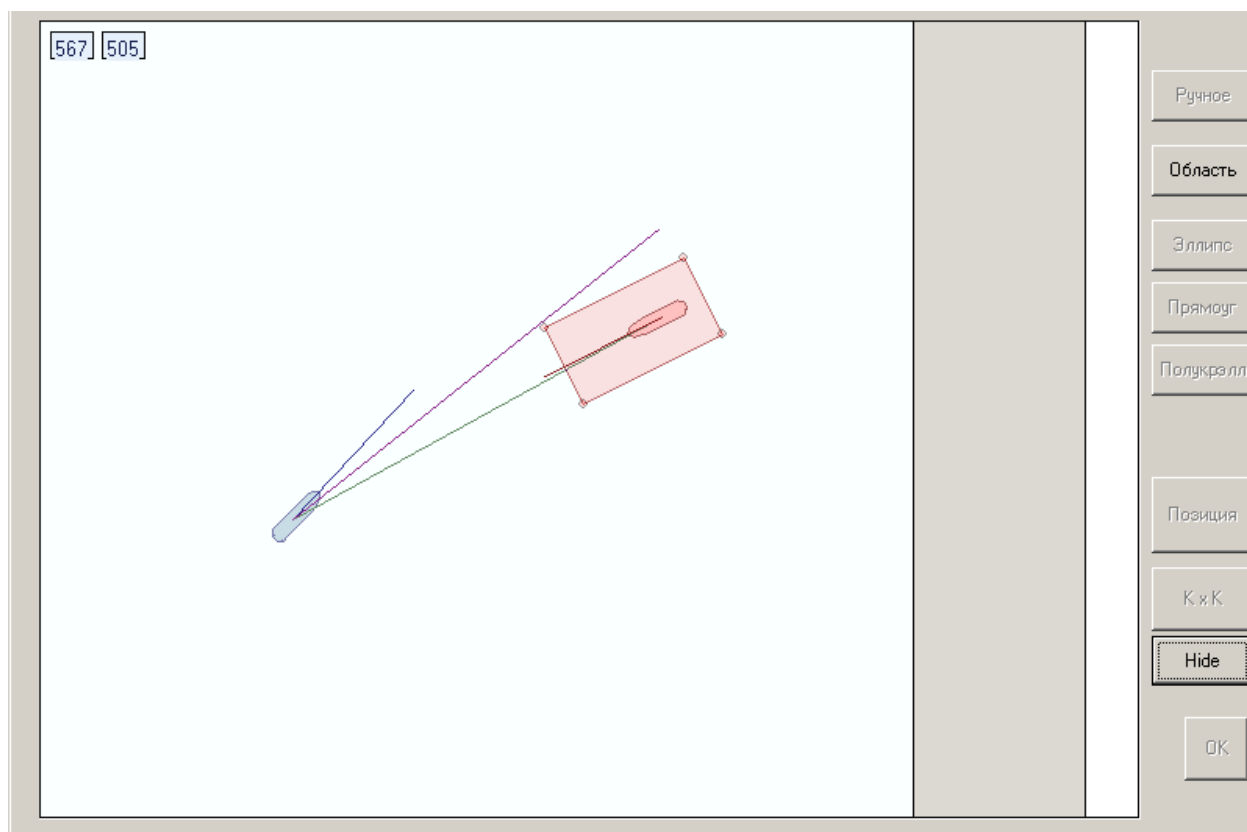


Рис. Г.30. Перевірка коректності маневру відносним ухиленням вліво

Г.7. Додаткові маневри розходження для ситуації в разі $V_1 = V_2$ для домену прямокутної форми.

Вибір маневру розходження відносним ухиленням вліво мінімальною зміною курсів обох суден вліво показаний на рис. Г.31, коректність обраного маневру розходження підтверджена рис. Г.32.

Вибір безпечного маневру розходження відносним ухиленням вправо збільшенням курсу першого судна і зменшенням курсу другого судна представлений на рис. Г.33, а на рис. Г.34 показана коректність маневру відносним ухиленням вправо.

На рис. Г.35 показаний вибір безпечного маневру розходження відносним ухиленням вліво збільшенням курсу першого судна і зменшенням курсу другого судна, а на рис. Г.36 підтверджена коректність маневру відносним ухиленням вліво.

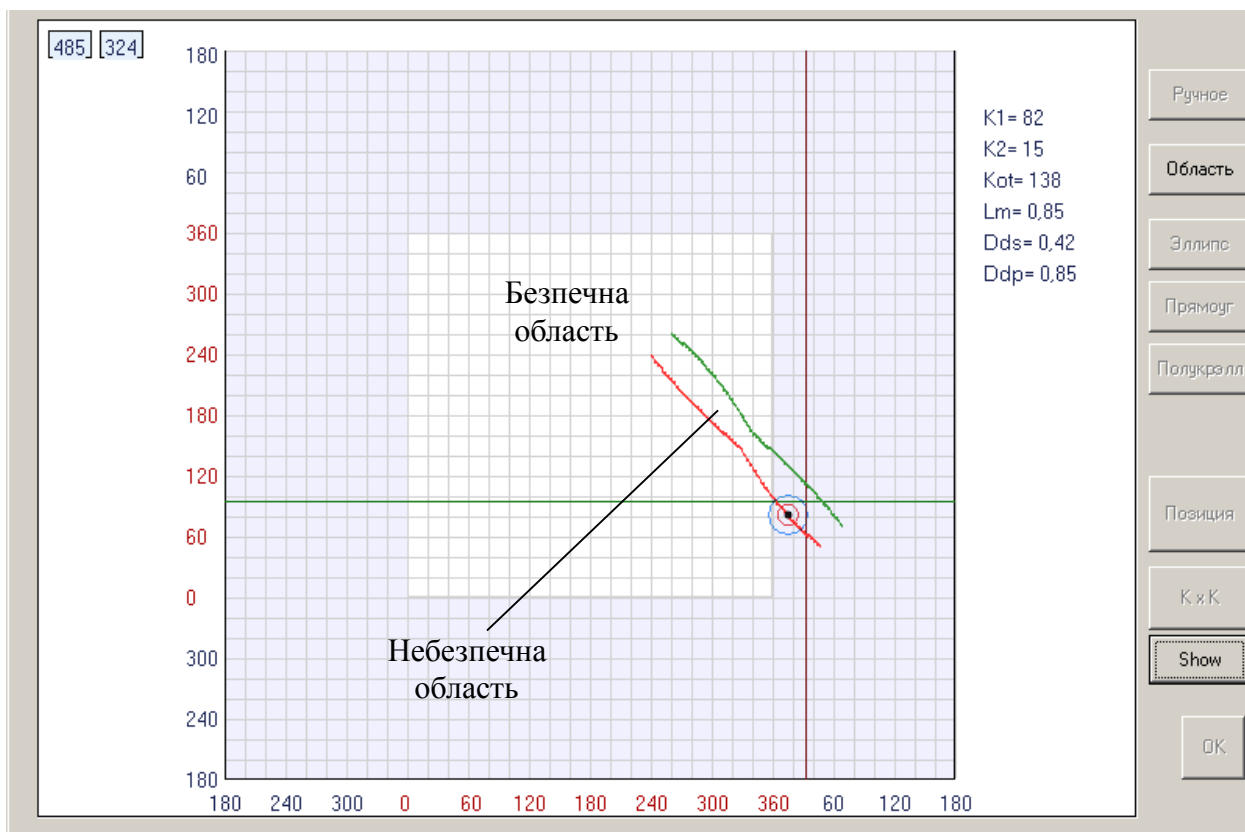


Рис. Г.31. Маневр розходження мінімальним ухиленням вліво

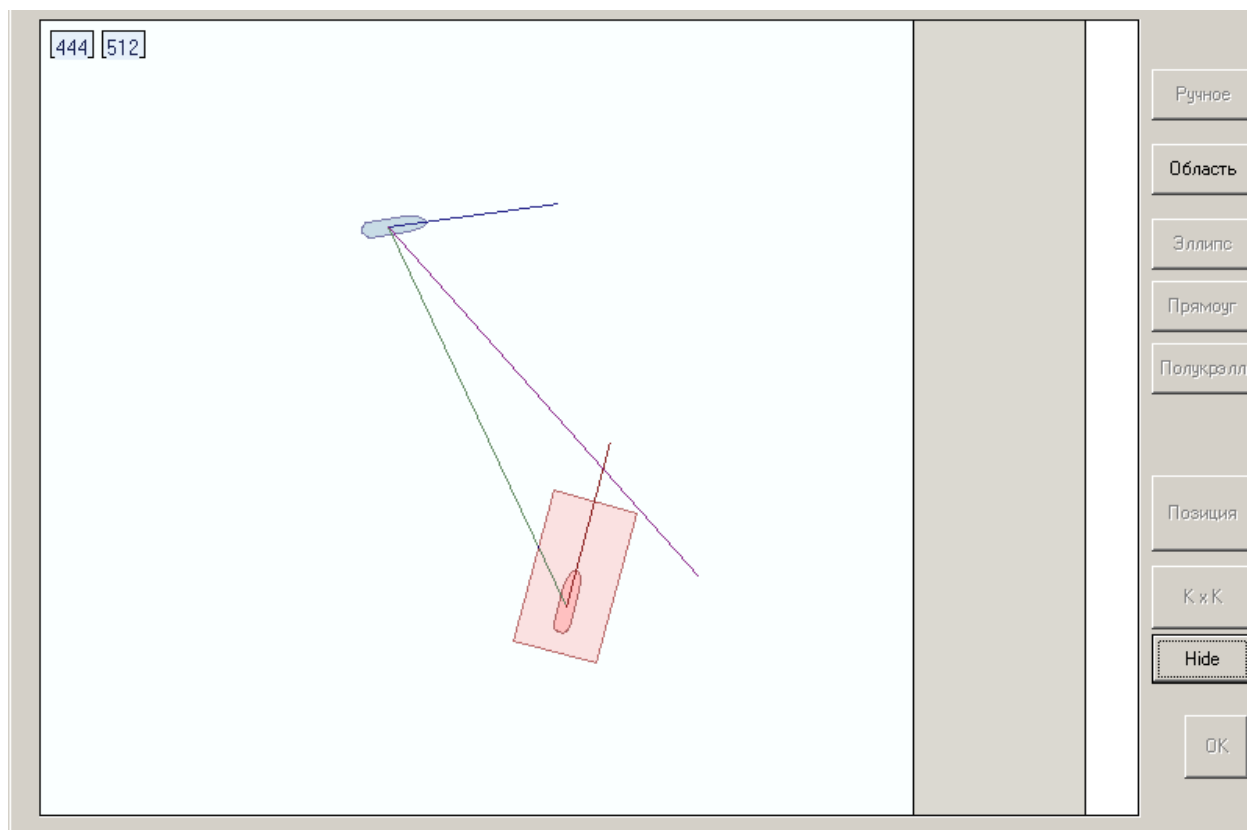


Рис. Г.32. Перевірка коректності маневру ухиленням вліво

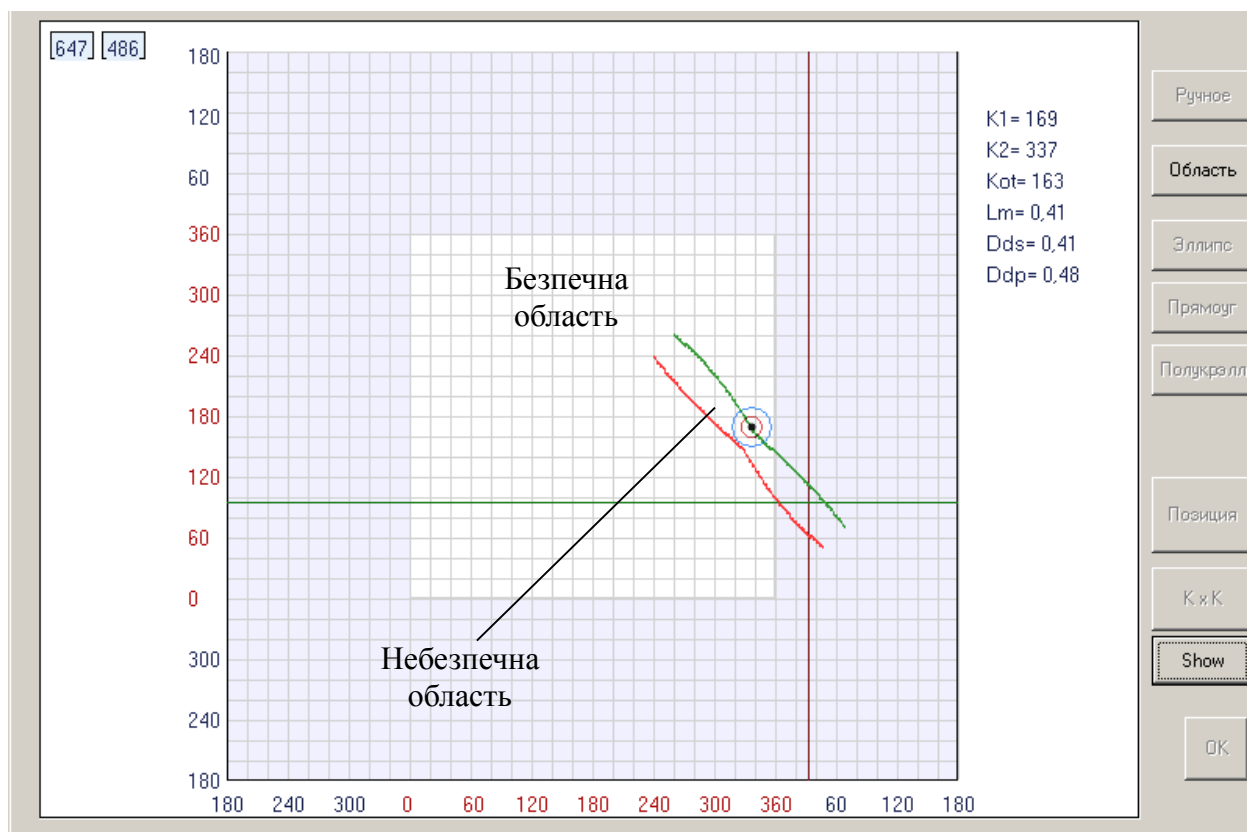


Рис. Г.33. Вибір маневру розходження відносним ухиленням вправо

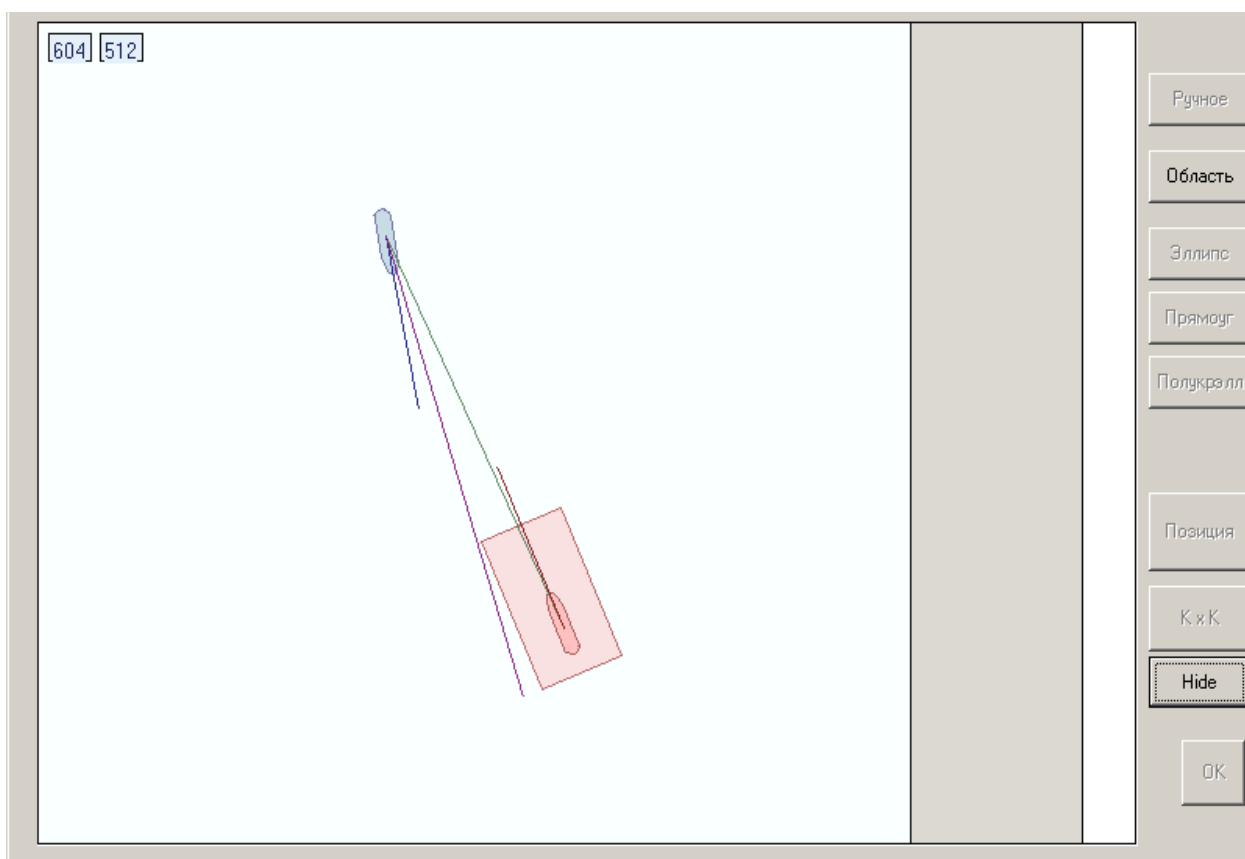


Рис. Г.34. Результати перевірки коректності маневру ухиленням вправо

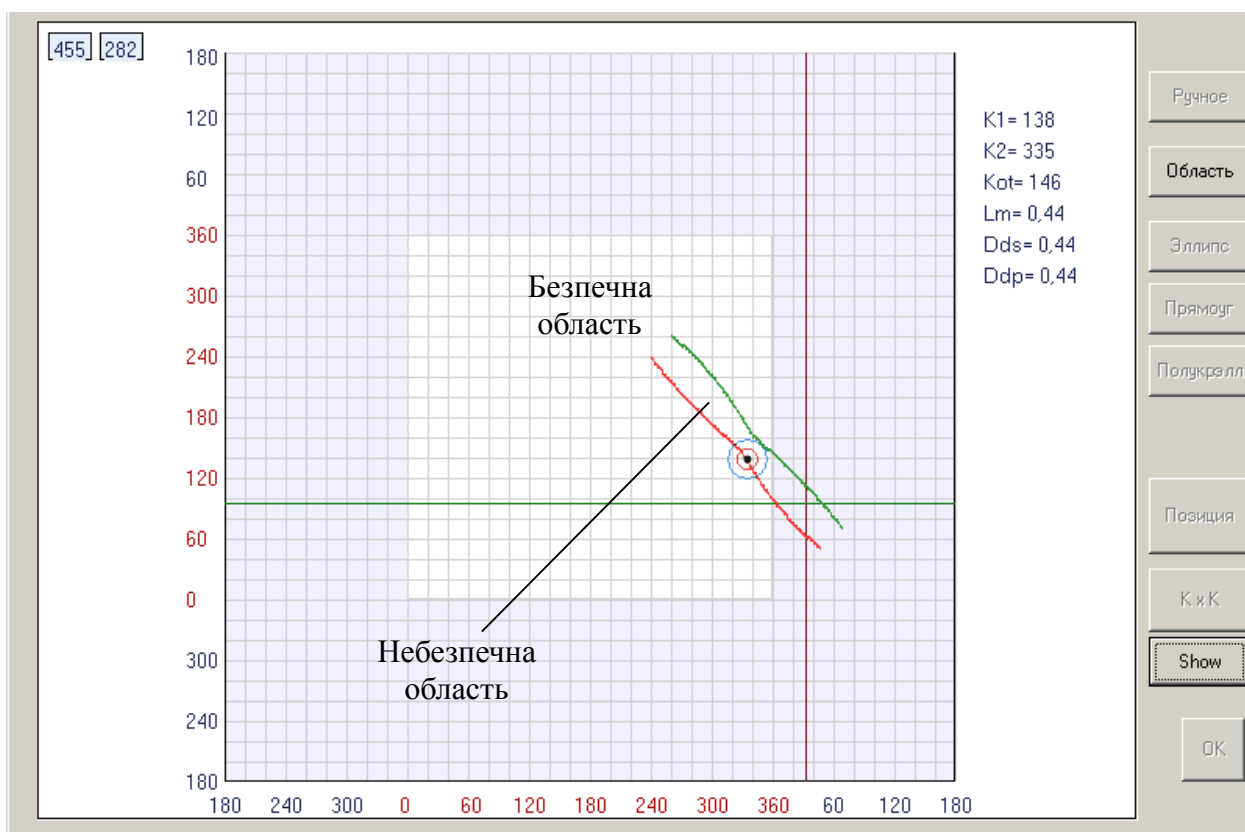


Рис. Г.35. Маневр розходження відносним ухиленням вліво

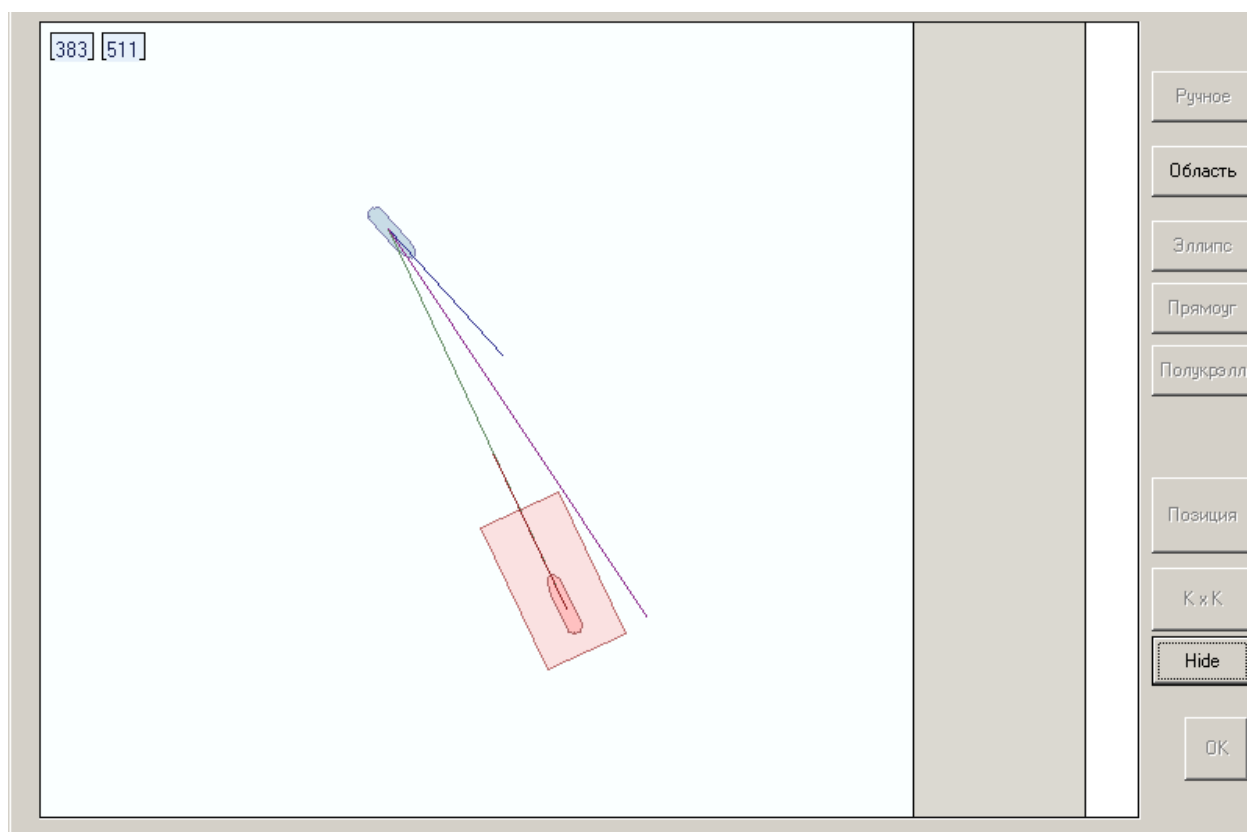


Рис. Г.36. Проверка корректности маневру відносним ухиленням вліво

ДОДАТОК Д

Д.1. Аналіз коректності методів формування області неприпустимих значень курсів суден за допомогою імітаційного моделювання.

Спочатку розглянемо методи формування області неприпустимих значень курсів суден стандартної аналітичної системи попередження зіткнень суден. Як раніше відмічалось, для стандартної аналітичної системи характерно, те, що використовується домен круглої форми.

На рис. Д.1 показана початкова ситуація небезпечного зближення суден елементарної групи та приведені значення її параметрів. У лівому нижньому кутку екрану виводиться індикатор безпеки зближення, за наявності ситуативного збурення відповідні сегменти індикатора забарвлюються в червоний колір. Для обох суден існують ситуативні збурення, тому обидва сегменти індикатора забарвлені в червоний колір. Для прикладу були змінені параметри початкової ситуації, зокрема курси обох суден змінені для першого судна з 45° на 130° , а для іншого – з 315° на 220° , як показано на рис. Д.2.

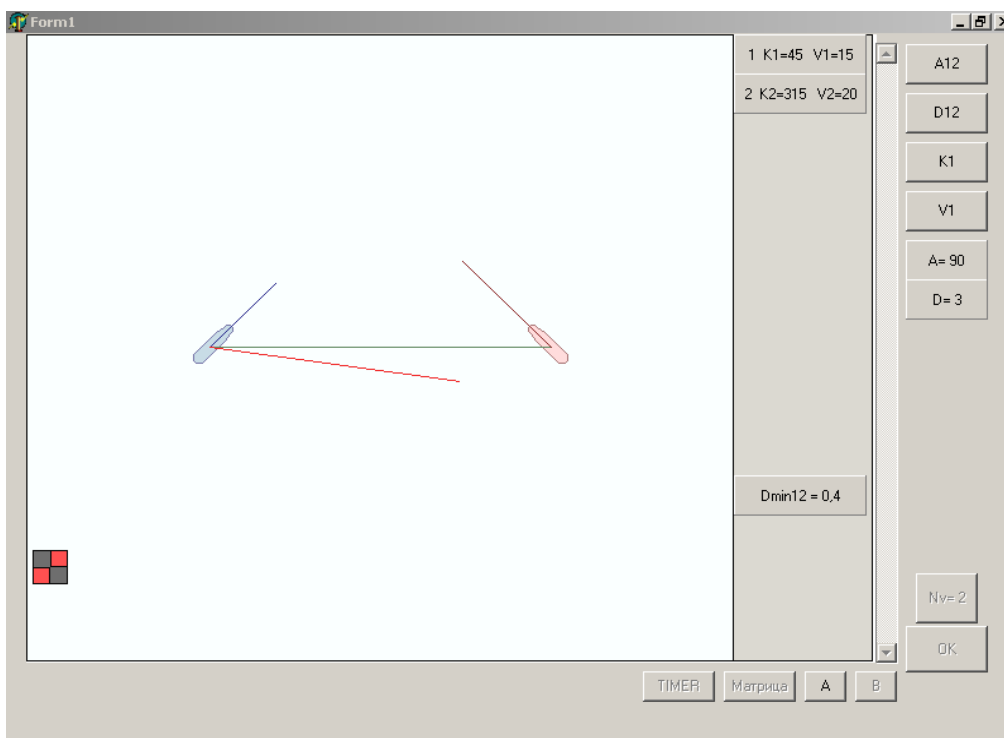


Рис. Д.1. Параметри початкової ситуації

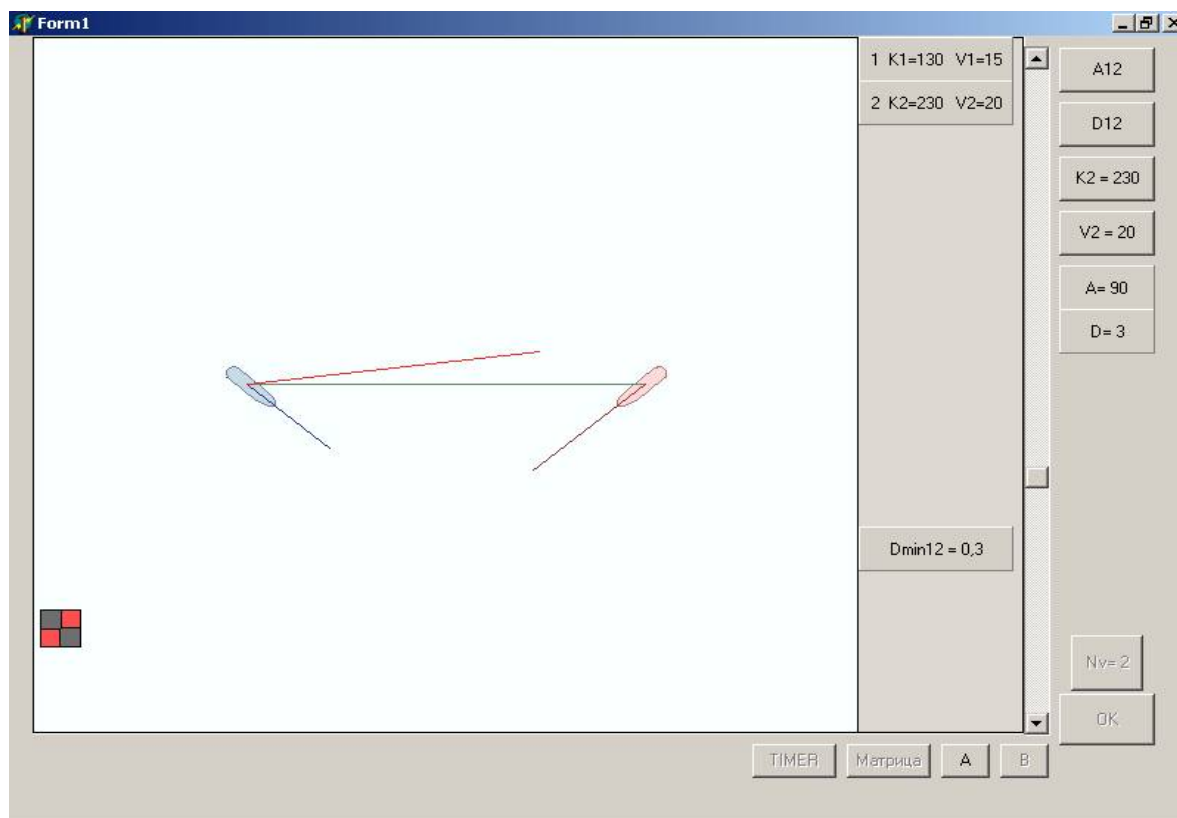


Рис. Д.2. Зміна параметрів початкової ситуації

При цьому значення курсів суден вводяться лінійкою прокрутки після використання клавіші «K1(2)», причому при зміні параметрів початкової ситуації розраховується дистанція найкоротшого зближення, яка виводиться на нижньому інформаційному табло і її значення в даному випадку рівне $D_{min12}=0,3$.

У даній ситуації є ситуативне збурення, що вимагає зміни курсу суден для його компенсації. Використовуючи клавішу «A», виводимо на екран монітора область небезпечних курсів даної пари суден, яка відображена на рис. Д.3. Якщо курси суден перетинаються в крапці, яка знаходиться на межі області небезпечних курсів, то дистанція найкоротшого зближення рівна гранично допустимій дистанції зближення. Якщо ж крапка належить області, то дистанція найкоротшого зближення менше гранично допустимій дистанції зближення, і існує ситуативне збурення.

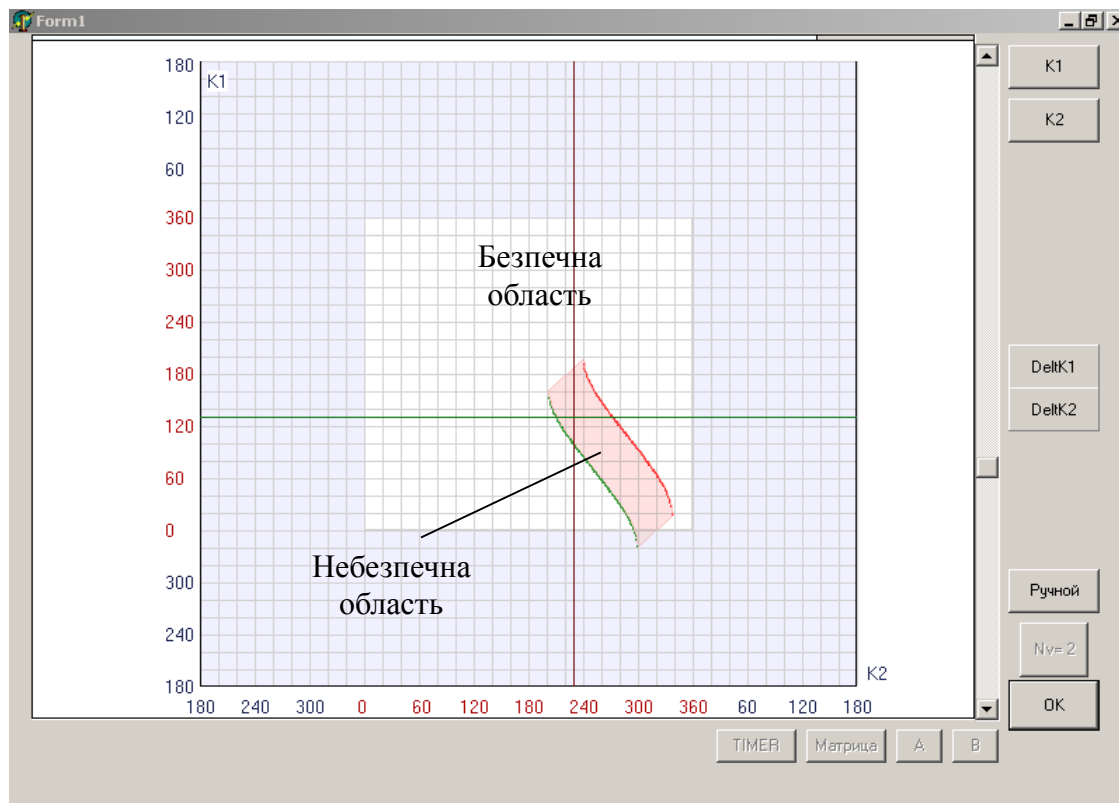


Рис. Д.3. Область неприпустимих значень курсів суден

На розширеній площині курсів пари суден їх початкові курси відображаються лініями, а їх точка перетину, як впливає з рис. Д.3, належить області небезпечних курсів, з чого виходить, що в даному випадку існує ситуативне збурення.

Для вибору безпечних курсів розходження суден необхідно використовувати клавіші «K1» або «K2», причому зміна курсу здійснюється за допомогою лінійки прокрутки. При цьому поточне значення змінного курсу виводиться на відповідну клавішу і відображається світлішими лініями (рис. Д.4). Курс першого судна змінений на 19° , а другого – на 11° , тобто до значень відповідно 111° і 219° . В цьому випадку точка перетину поточних курсів знаходиться на межі області небезпечних курсів, і дистанція найкоротшого зближення 1,07 приблизно рівна гранично допустимій дистанції, завдане значення якої прийнято 1 милі. При цьому обидва сектори індикатора безпеки зближення забарвлюється в ясно зелений колір, а також активізується клавіша «TIMER».

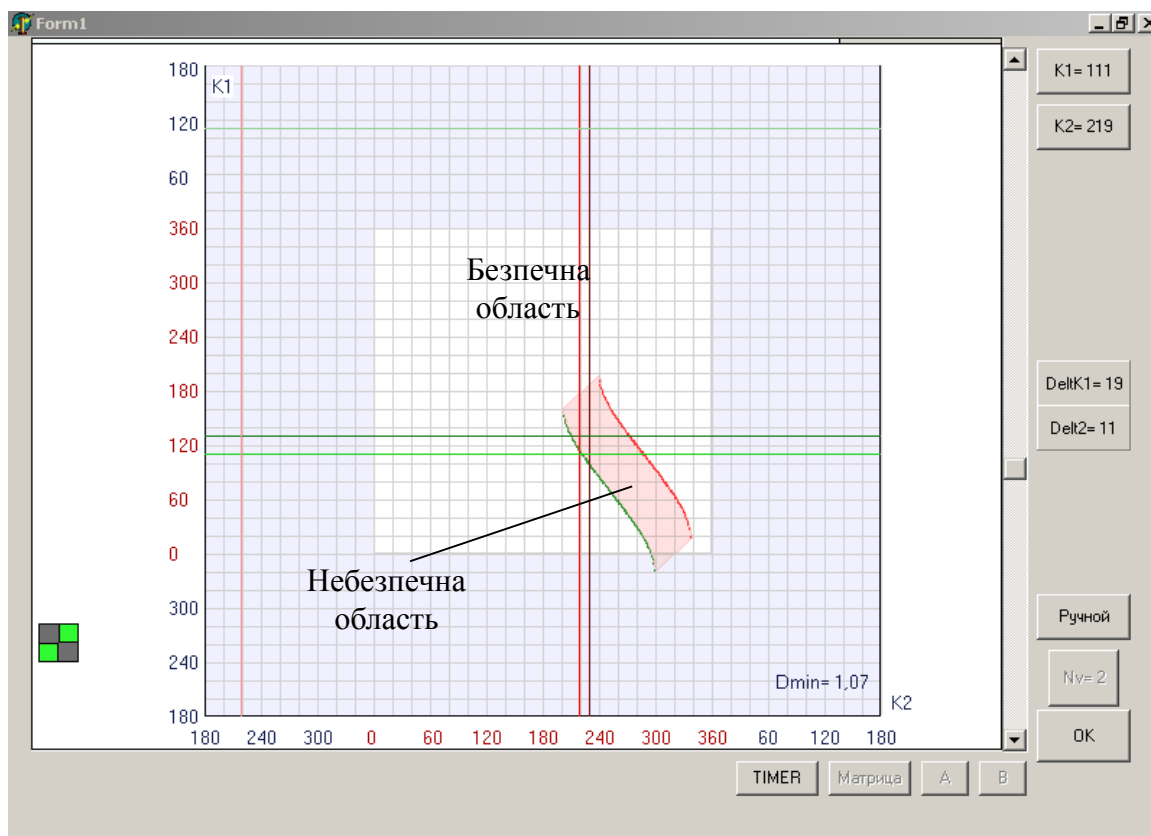


Рис. Д.4. Вибір безпечних курсів ухилення суден

Для перевірки коректності вибраних курсів ухилення суден з допомогою клавіші «TIMER» імітаційною програмою програвється маневр розходження суден. При цьому на екран монітору виводиться початкова позиція суден з вибраним курсами ухилення, а на праву частину монітору виводяться інформаційні панелі, на яких відображається поточний час маневру програвання, а також курси суден. У лівому верхньому кутку екрану приводиться поточне значення дистанції між суднами.

На рис. Д.5 приведена ситуація розходження суден на момент часу 5 с, а на рис. Д.6 показана ситуація найкоротшого зближення суден у момент часу, рівний 351 с, в який дистанція найкоротшого зближення рівна 1,06 милі, тобто практично гранично - допустимій дистанції. Ситуація завершення програвання маневру показана на рис. Д.7.

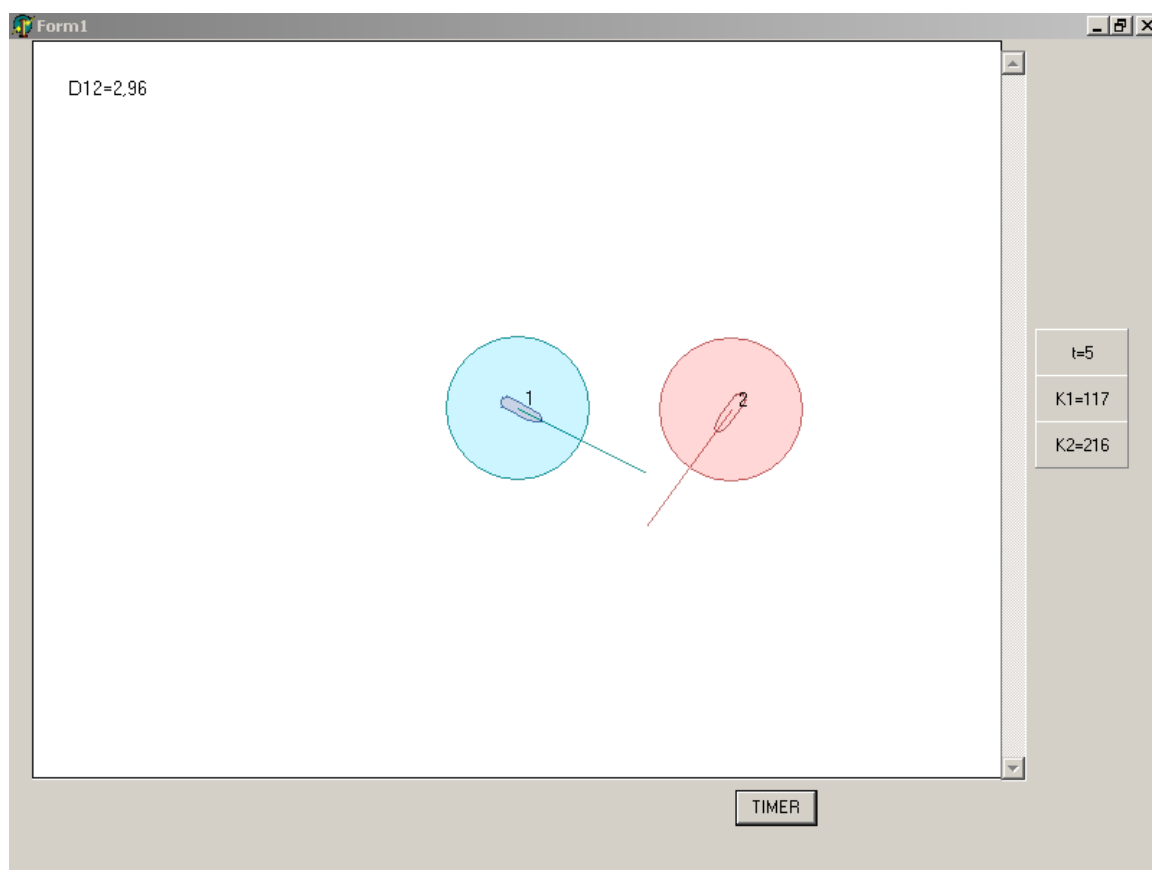


Рис. Д.5. Початкова ситуація при програванні маневру

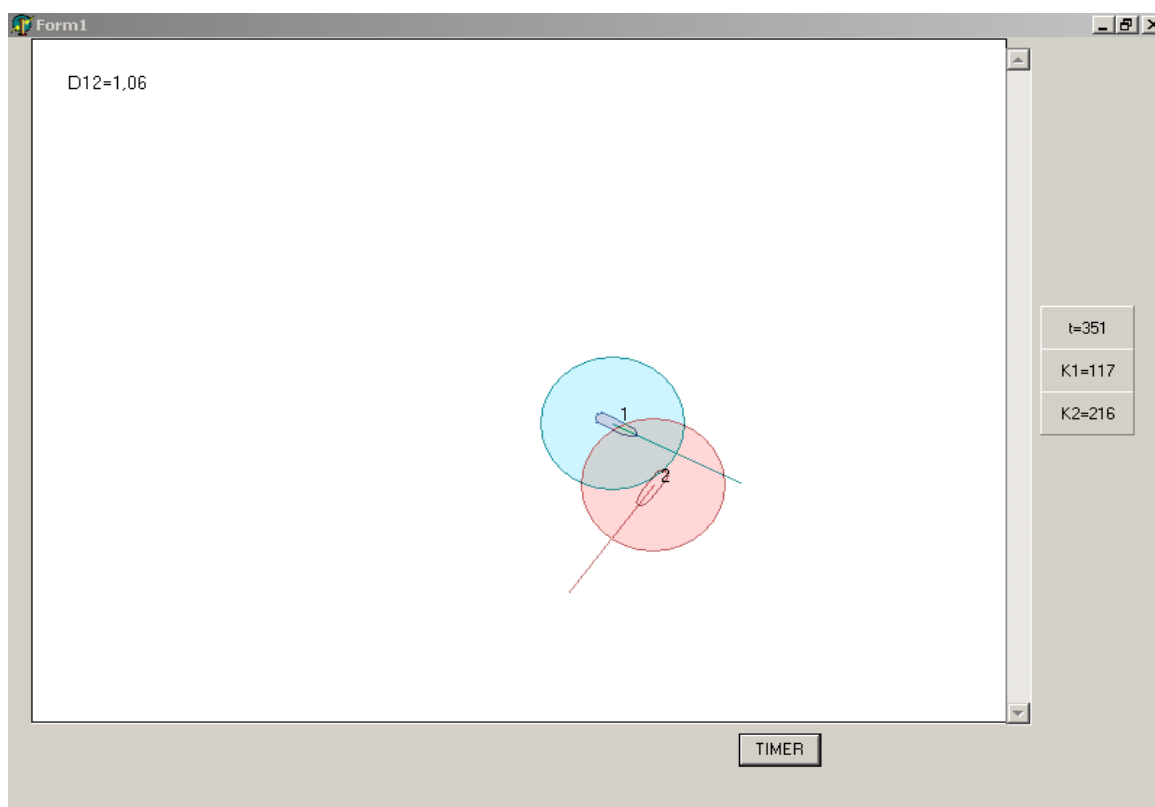


Рис. Д.6. Ситуація найкоротшого зближення

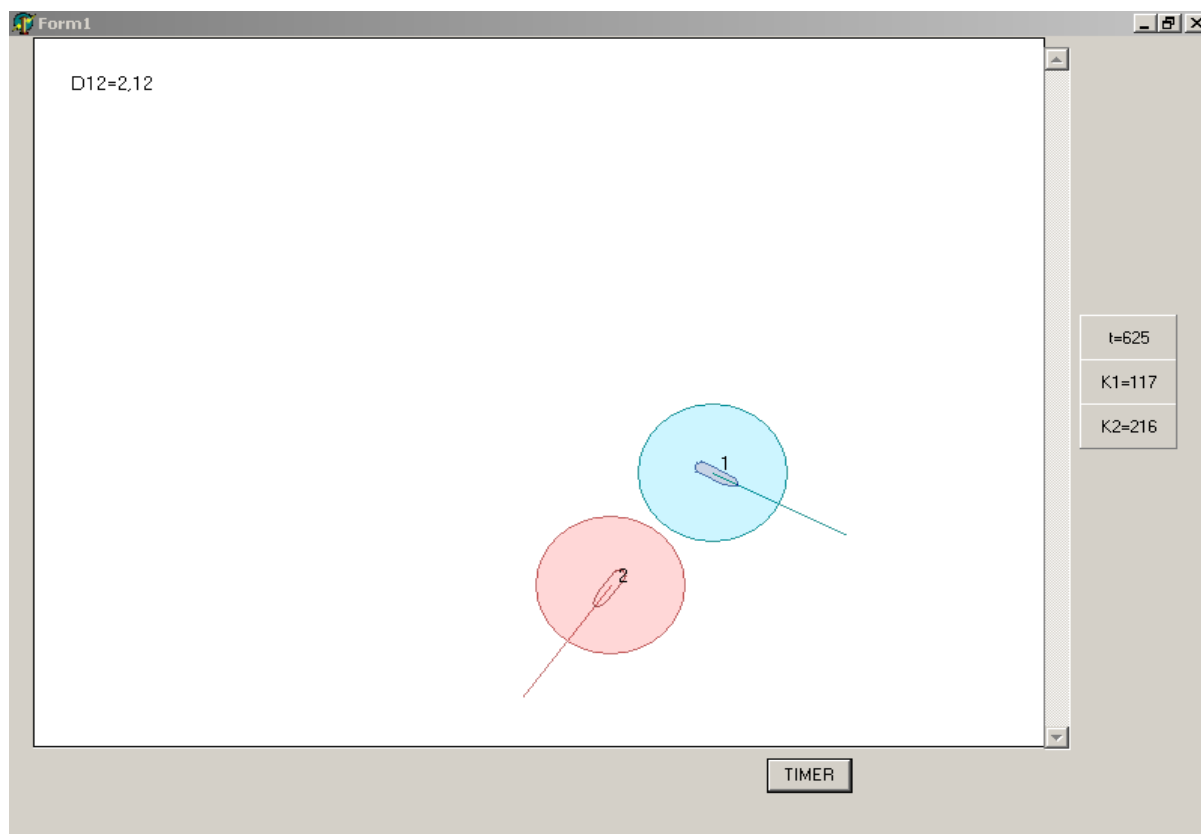


Рис. Д.7. Завершення процесу програвання маневру

В Додатку В було розглянуто ситуацію небезпечного зближення трьох суден, показану на рис. В.21, і визначено їх курси ухилення для безпечного розходження. Для перевірки коректності одержаного маневру розходження було проведено його імітаційне моделювання, результати якого розглянемо.

На рис. Д.8 показана початкова частина маневру програвання, причому показана ситуація зближення трьох суден на 31 с часу. Ситуація найкоротшого зближення на 1,06 милі другого і третього суден на 539 с часу показана на рис. Д.9.

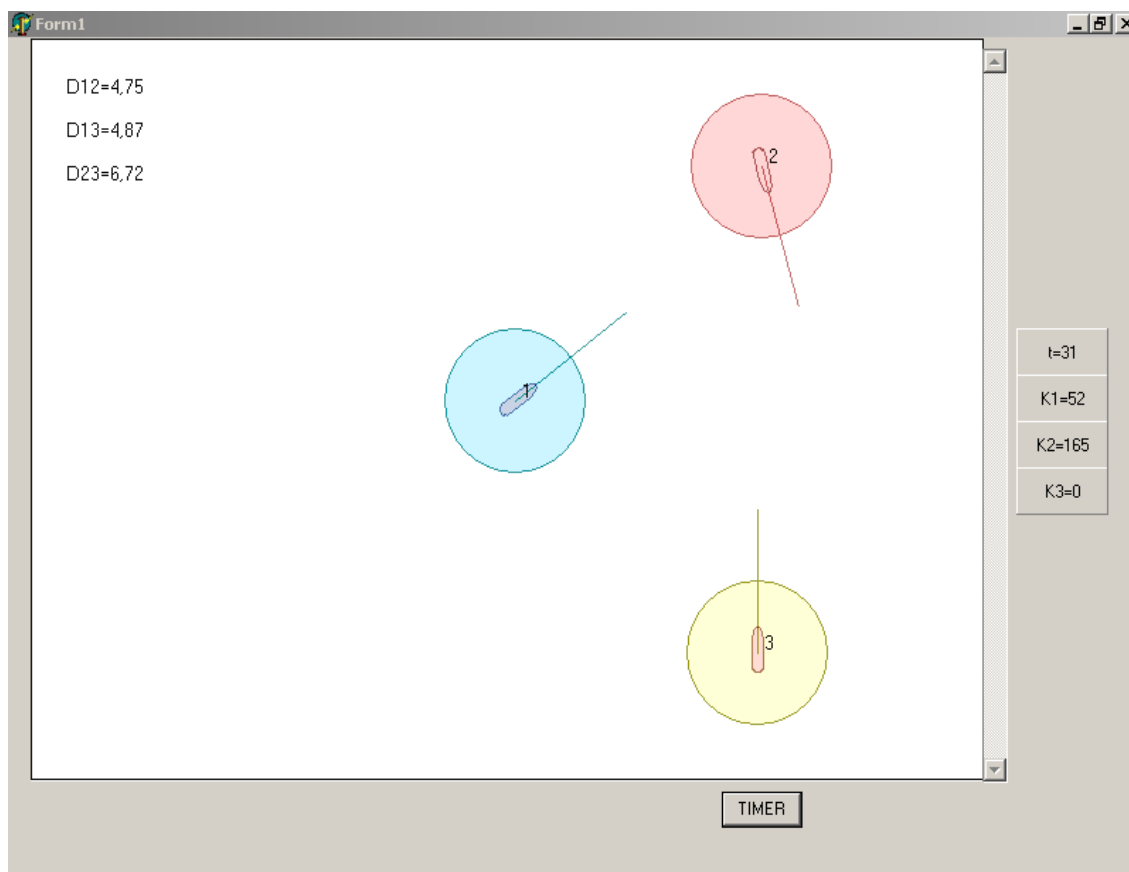


Рис. Д.8. Початкова ситуація при програванні маневру

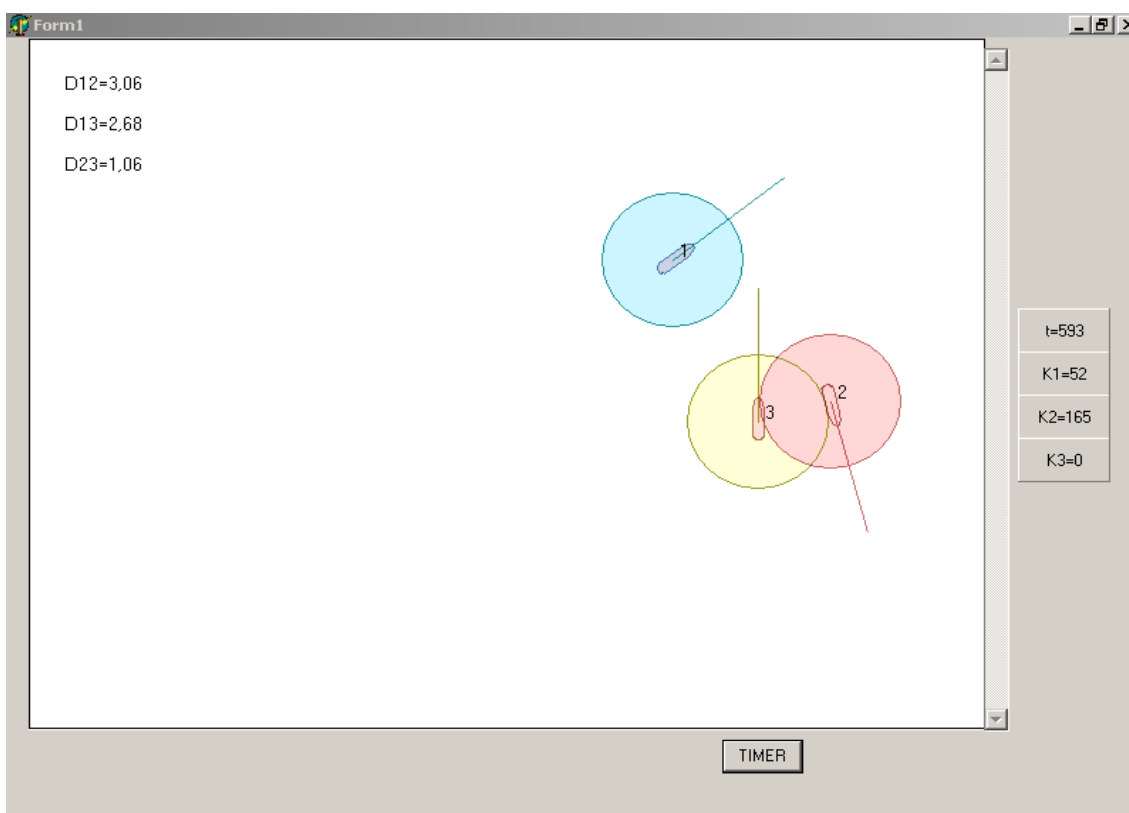


Рис. Д.9. Ситуація найкоротшого зближення другого і третього суден

На рис. Д.10 представлена ситуація найкоротшого зближення першого і третього суден, яка відбувається на 1181 с процесу програвання маневру розходження при дистанції між суднами, рівної 1,66 милі.

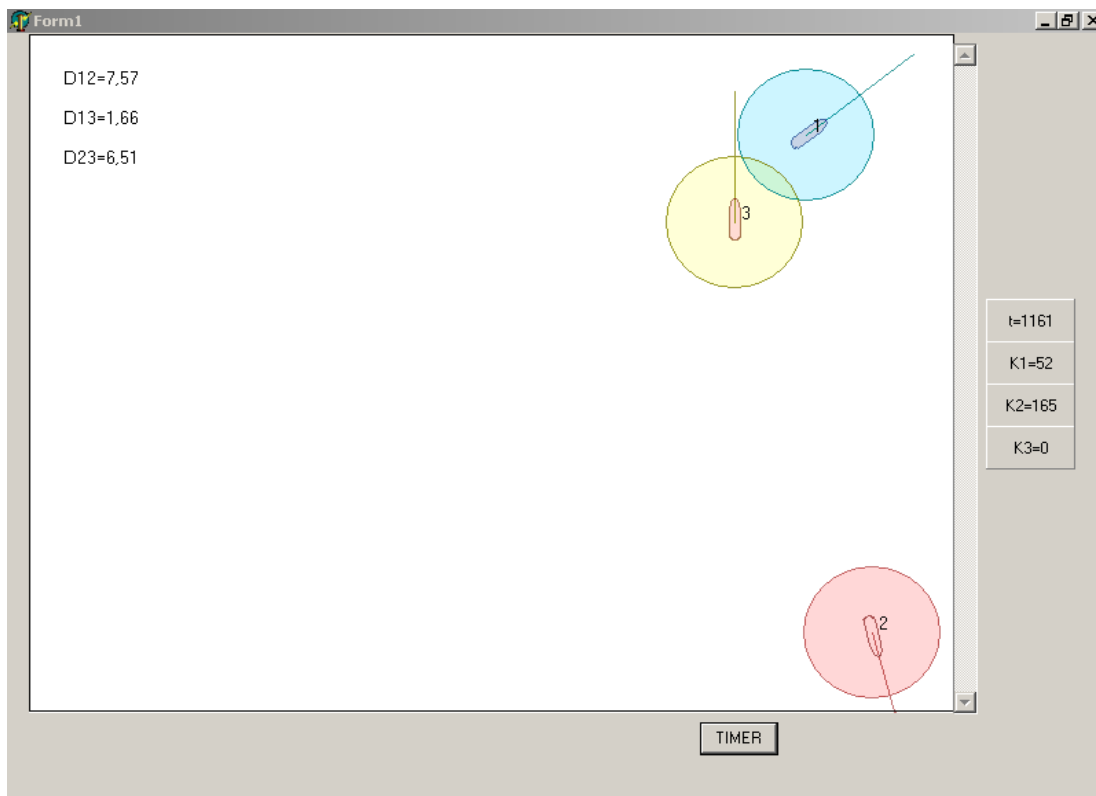


Рис. Д.10. Ситуація найкоротшого зближення першого і третього суден

В Додатку В також було розглянуто ситуацію небезпечного зближення чотирьох суден, показану на рис. В.26, і визначено їх курси ухилення для безпечного розходження, як показано на рис. Д.11. Імітаційне моделювання одержаного маневру розходження для перевірки його коректності також розглянемо в даному підрозділі.

Ситуація програвання маневру розходження суден на 3 с часу показана на рис. Д.12, з якого видно, що перше, друге і третє судна змінили початкові курси, а четверте судно слідує початковим курсом.

Слід зазначити, що вибраний варіант курсів розходження суден є одним з можливих, і представлений тут лише для ілюстрації пропонованого графічного методу визначення оптимального маневру розходження групи суден за допомогою комп'ютерного моделювання.

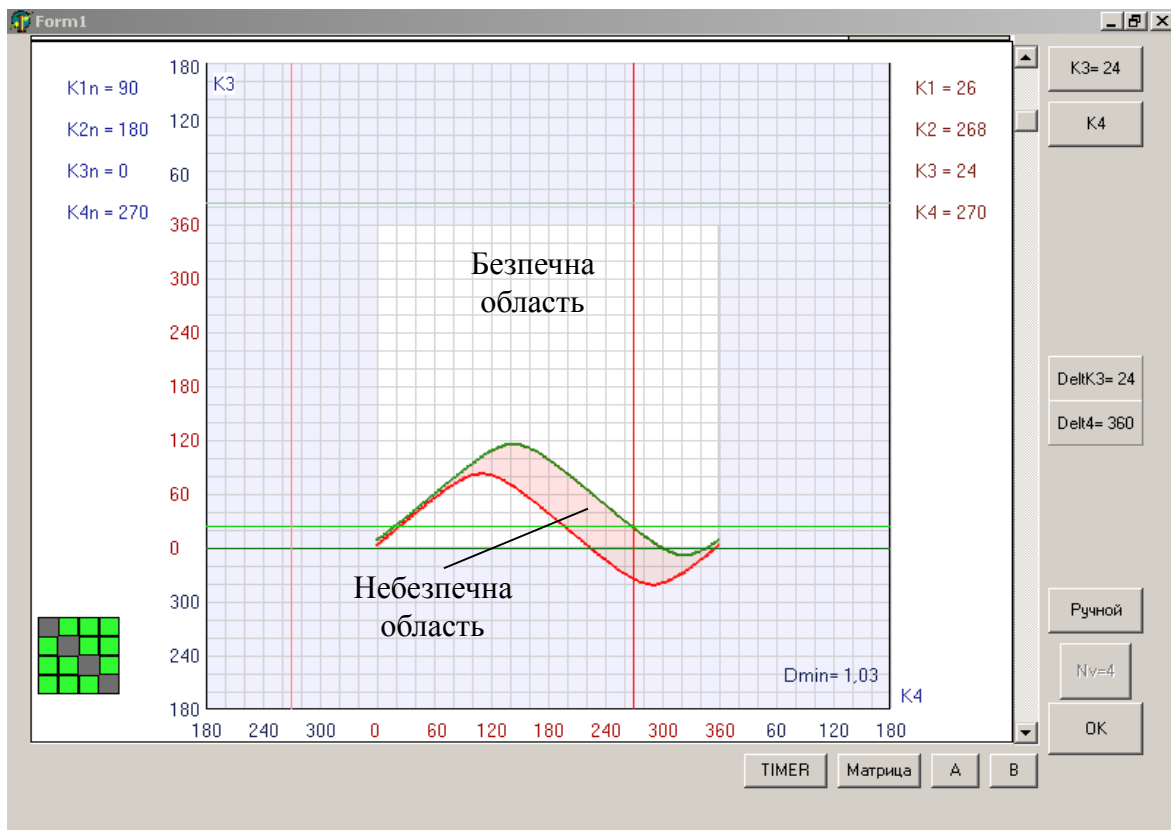


Рис. Д.11. Курси ухилення суден

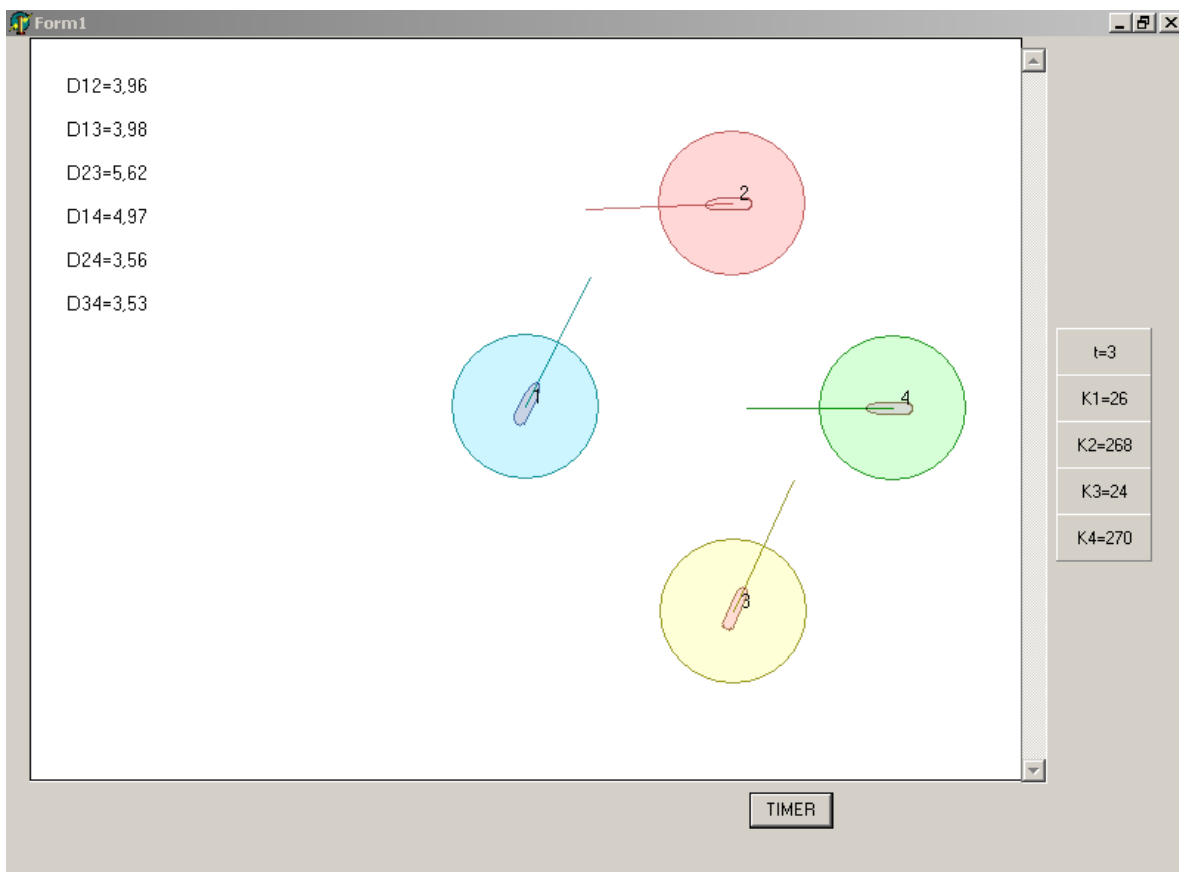


Рис. Д.12. Ситуація процесу розходження на 3 с часу

Першими на найкоротшу дистанцію зближуються третє і четверте судна (рис. Д.13). Момент часу найкоротшого зближення цієї пари суден рівний 322 с, причому сама дистанція найкоротшого зближення складає 1,04 милі, що відповідає мінімальній дистанції між суднами при виборі безпечного курсу третього судна.

У момент часу, рівний 463 с, дистанції найкоротшого зближення 1,18 милі досягають перше і друге судна, як показано на рис. Д.14, а дистанція найкоротшого зближення між першим і четвертим судами значенням 2,14 милі досягається на 534 с часу (рис. Д.15).

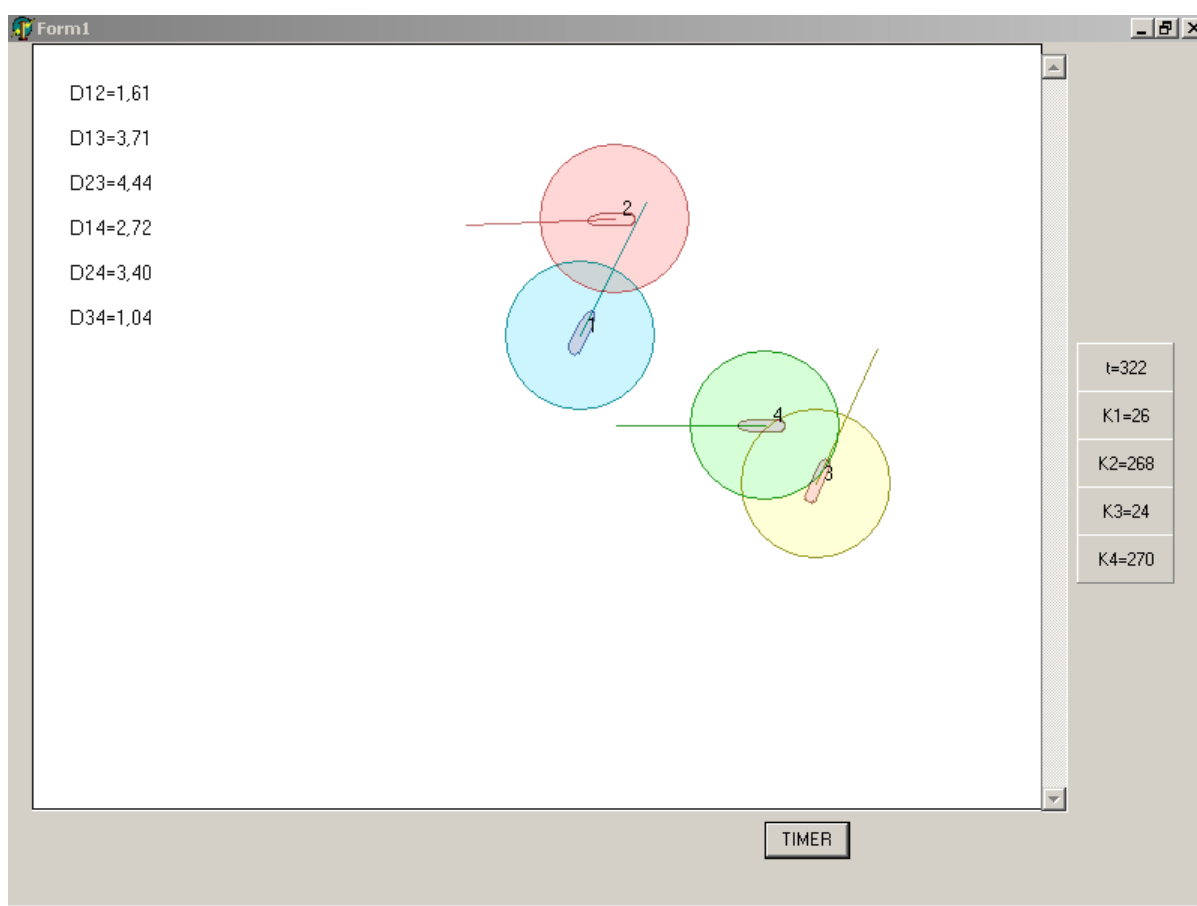


Рис. Д.13. Ситуація найкоротшого зближення третього і четвертого суден

Розглянемо імітаційне моделювання процесу розходження групи п'яти суден, початкова ситуація небезпечного зближення яких приведена в розділі 6 на рис. 6.16.

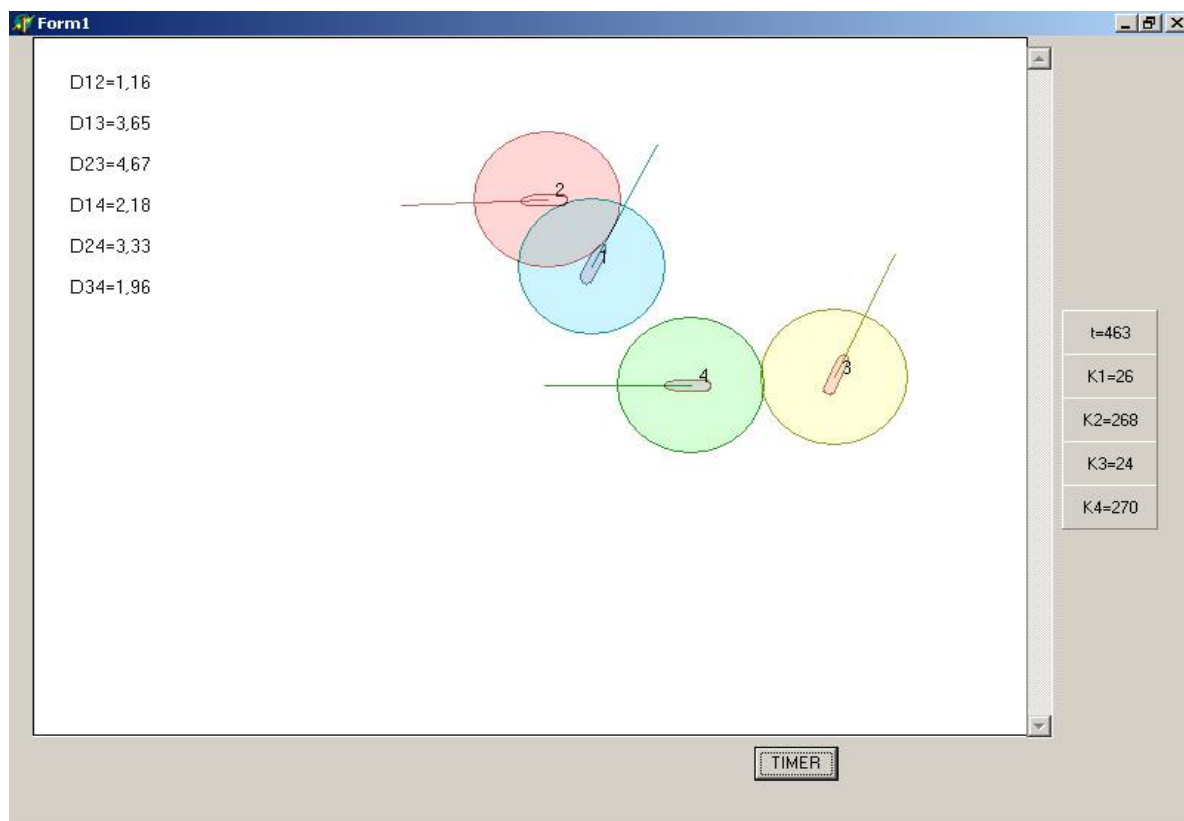


Рис. Д.14. Ситуація найкоротшого зближення першого і другого суден

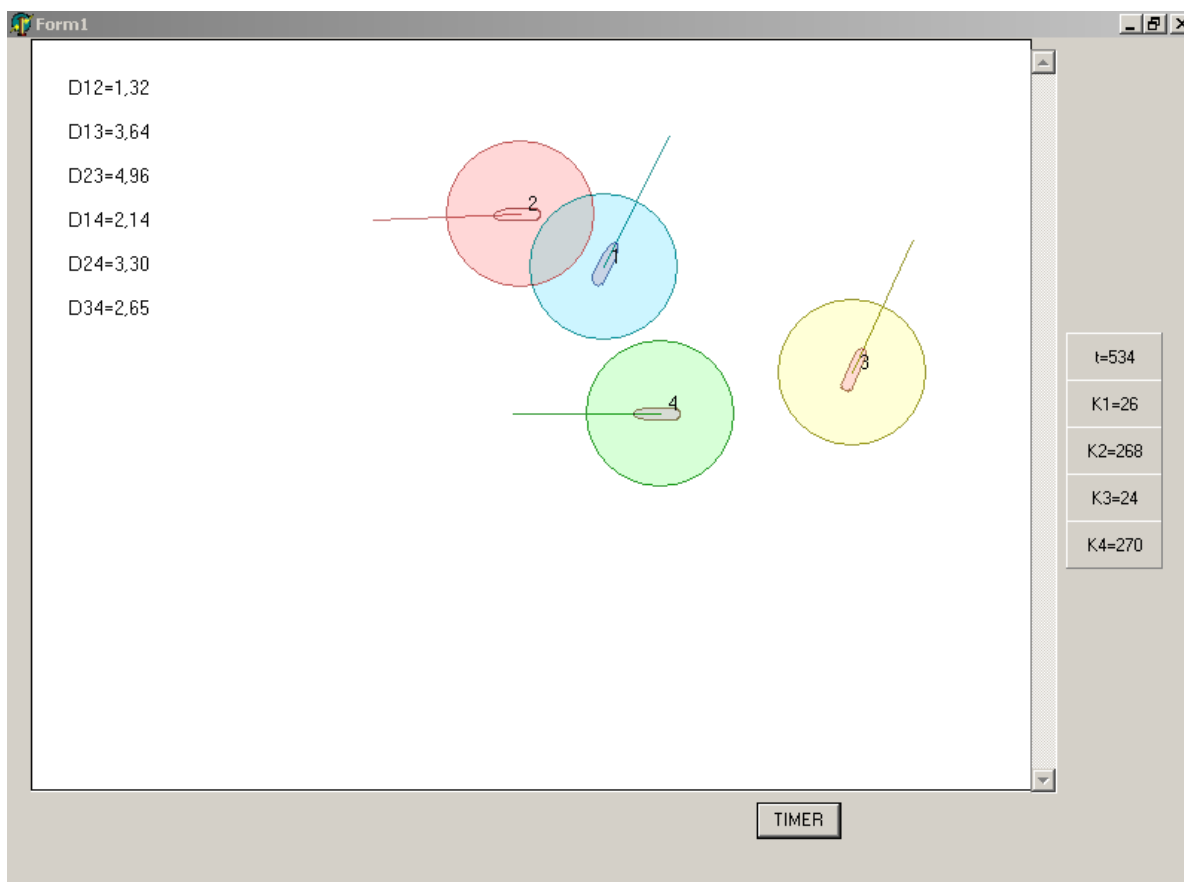


Рис. Д.15. Ситуація найкоротшого зближення першого і четвертого суден

На рис. Д.16 показана початкова ситуація розходження суден. Ситуація найкоротшого зближення третього і четвертого суден на 252 с часу показана на рис. Д.17.

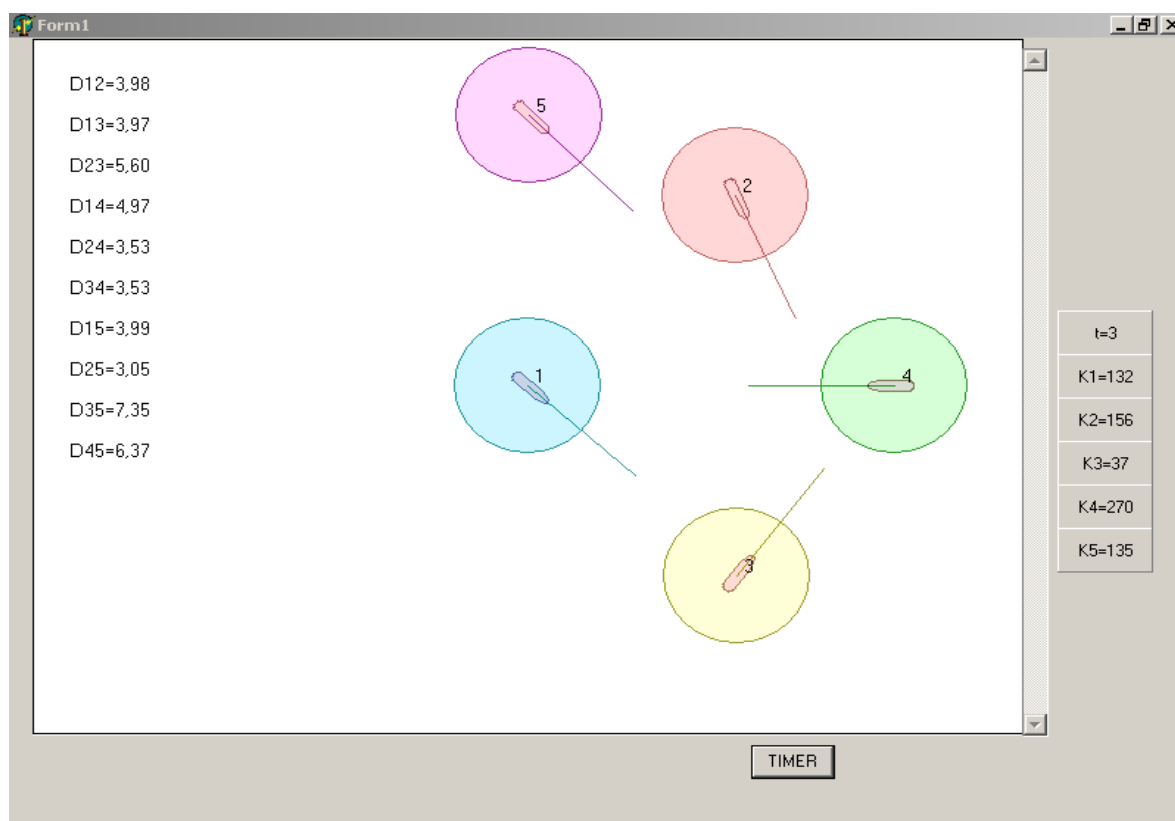


Рис. Д.16. Початкова ситуація процесу розходження

Чергове найкоротше зближення другого і четвертого суден відбувається на 355 с часу, як показано на рис. Д.18. При цьому дистанція найкоротшого зближення рівна 1,29 милі. На 499 с досягається найкоротше зближення першого і четвертого суден на дистанцію 1,44 милі (рис. Д.19).

Найкоротше зближення другого і третього суден відбувається на 522 с часу, причому судна зближуються на 1,00 милі, як показано на рис. 8.20. Значення дистанції між суднами групи на момент закінчення процесу розходження показані в лівій частині екрану монітору.

Таким чином, в розглянутій ситуації небезпечного зближення групи суден, яка містить п'ять одиниць, зміною курсів трьох суден відбувається перетворення матриці ситуативного збурення в нульову матрицю.

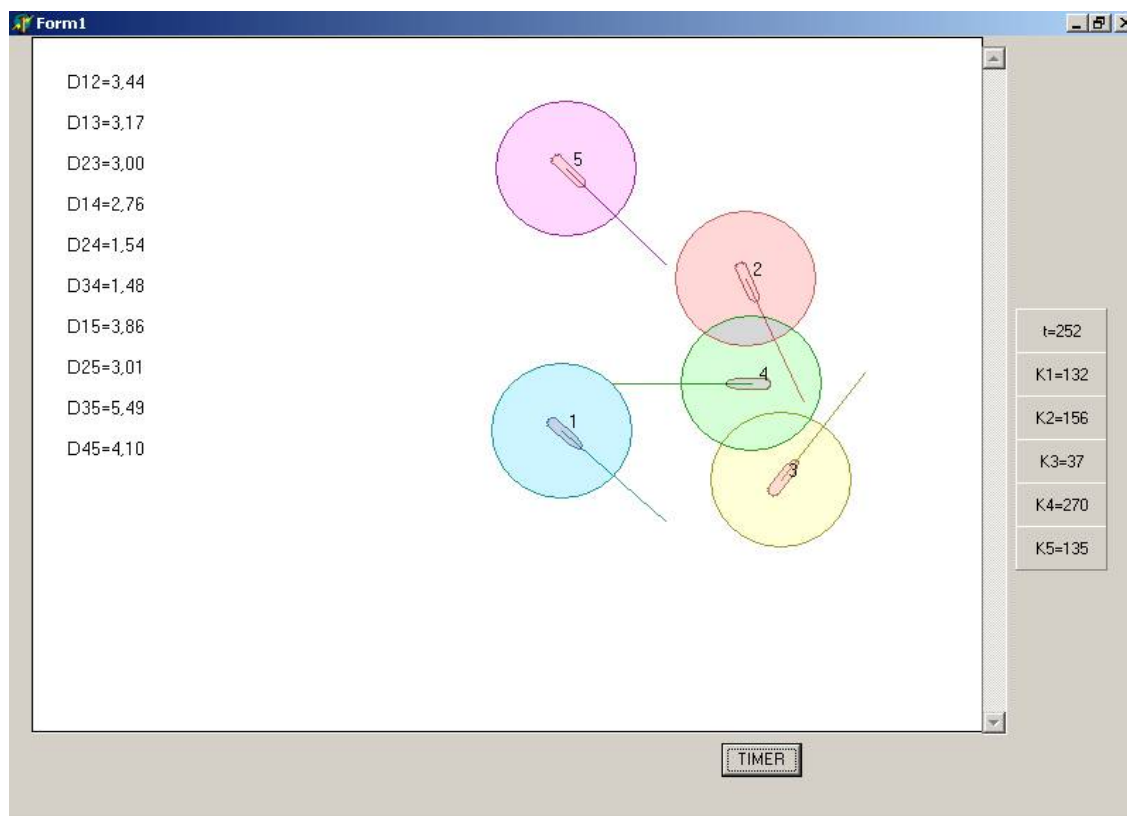


Рис. Д.17. Ситуація найкоротшого зближення третього і четвертого суден

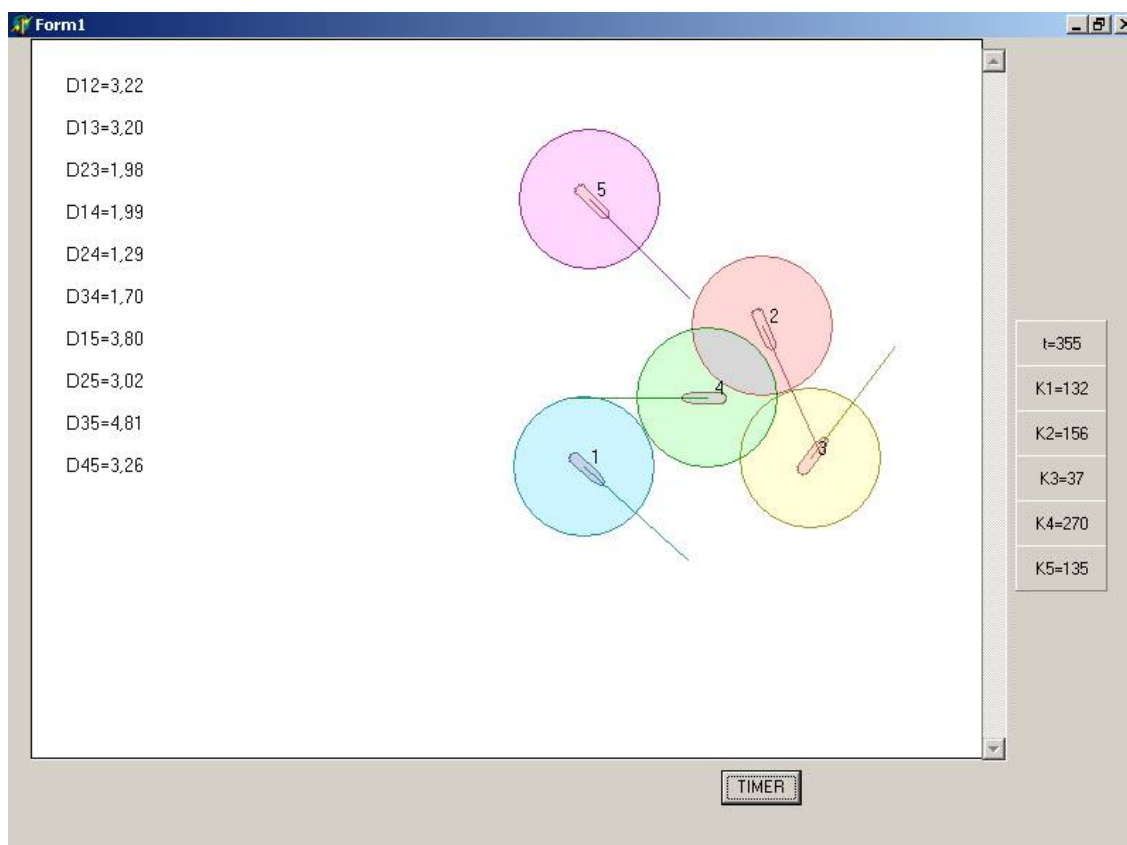


Рис. Д.18. Ситуація найкоротшого зближення четвертого і другого суден

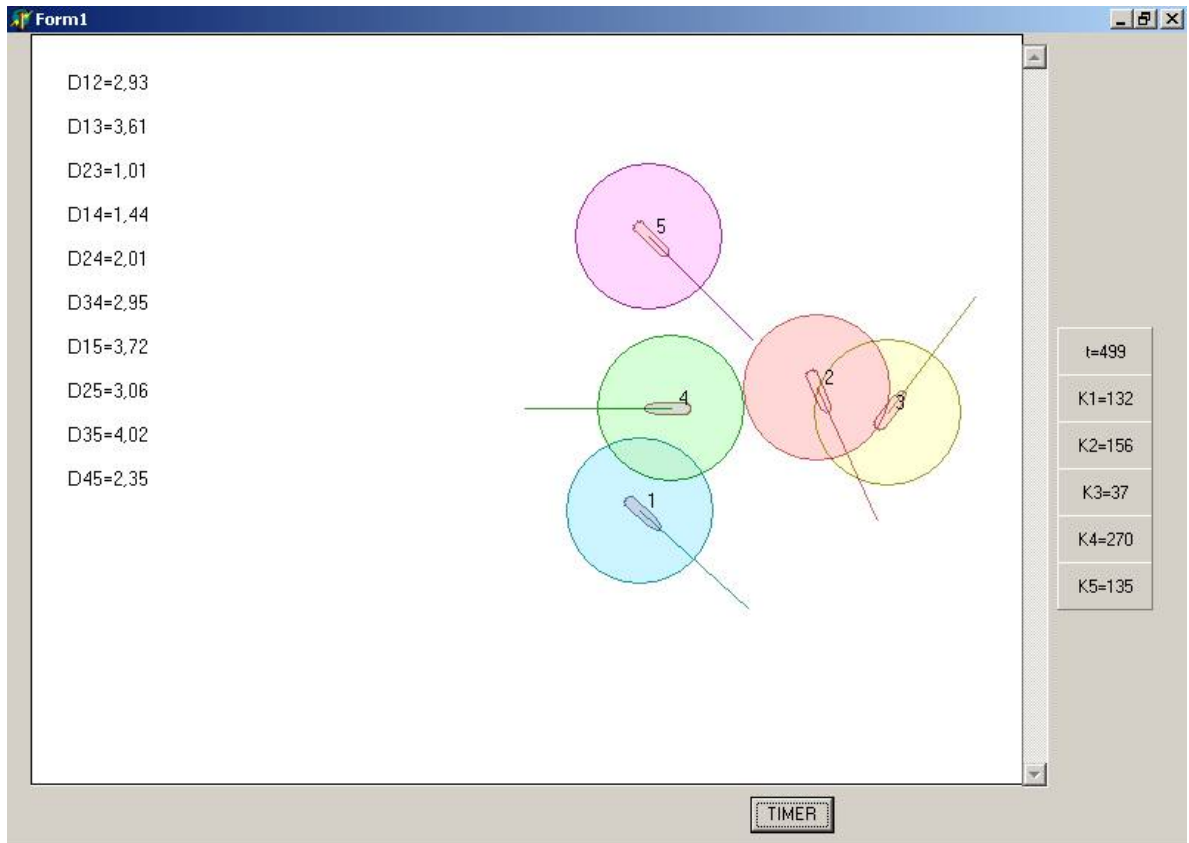


Рис. Д.19. Ситуація найкоротшого зближення першого і четвертого суден

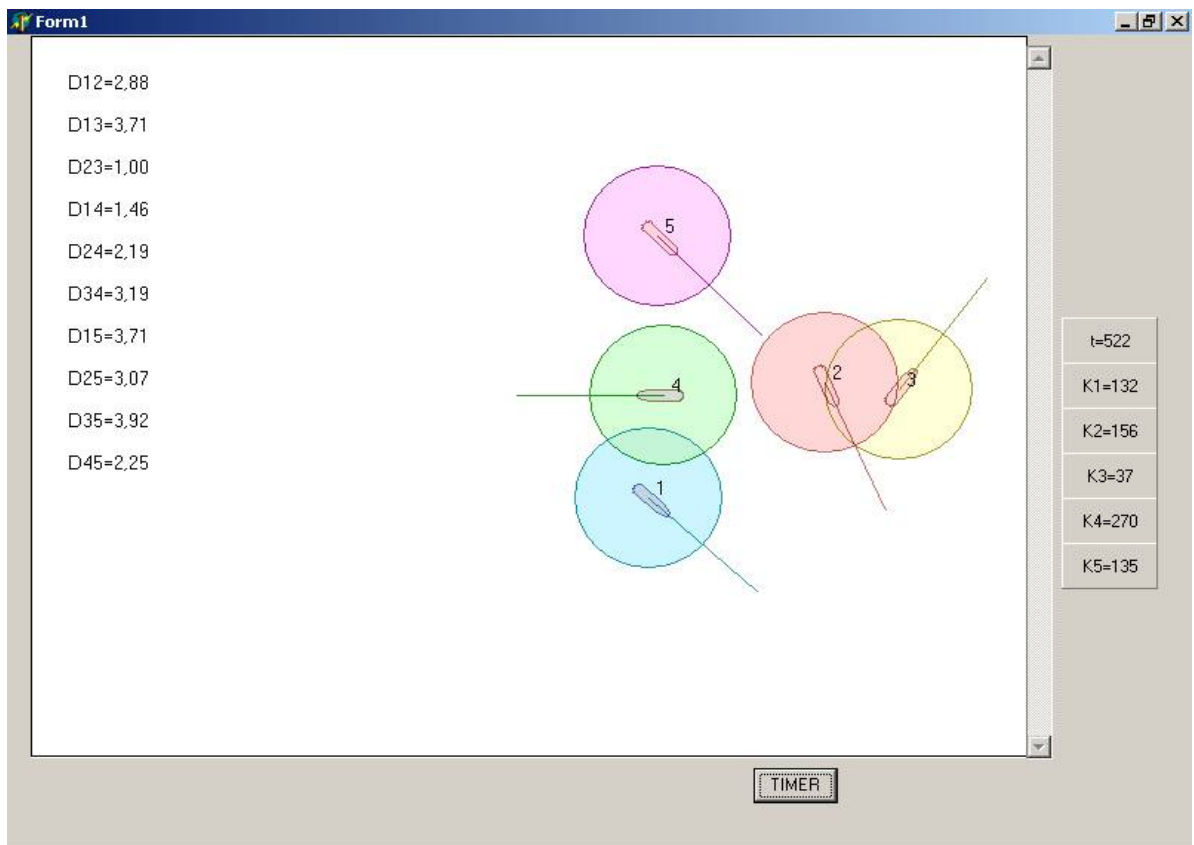


Рис. Д.20. Ситуація найкоротшого зближення другого і третього суден

Д.2. Перевірка імітаційним моделюванням коректності методів формування області неприпустимих значень швидкостей суден.

Розглянемо імітацію маневру розходження зниженням швидкості суден, Для чого перш за все скористаємося початковою ситуацією, характеристики якої представлені на рис. Д.21.

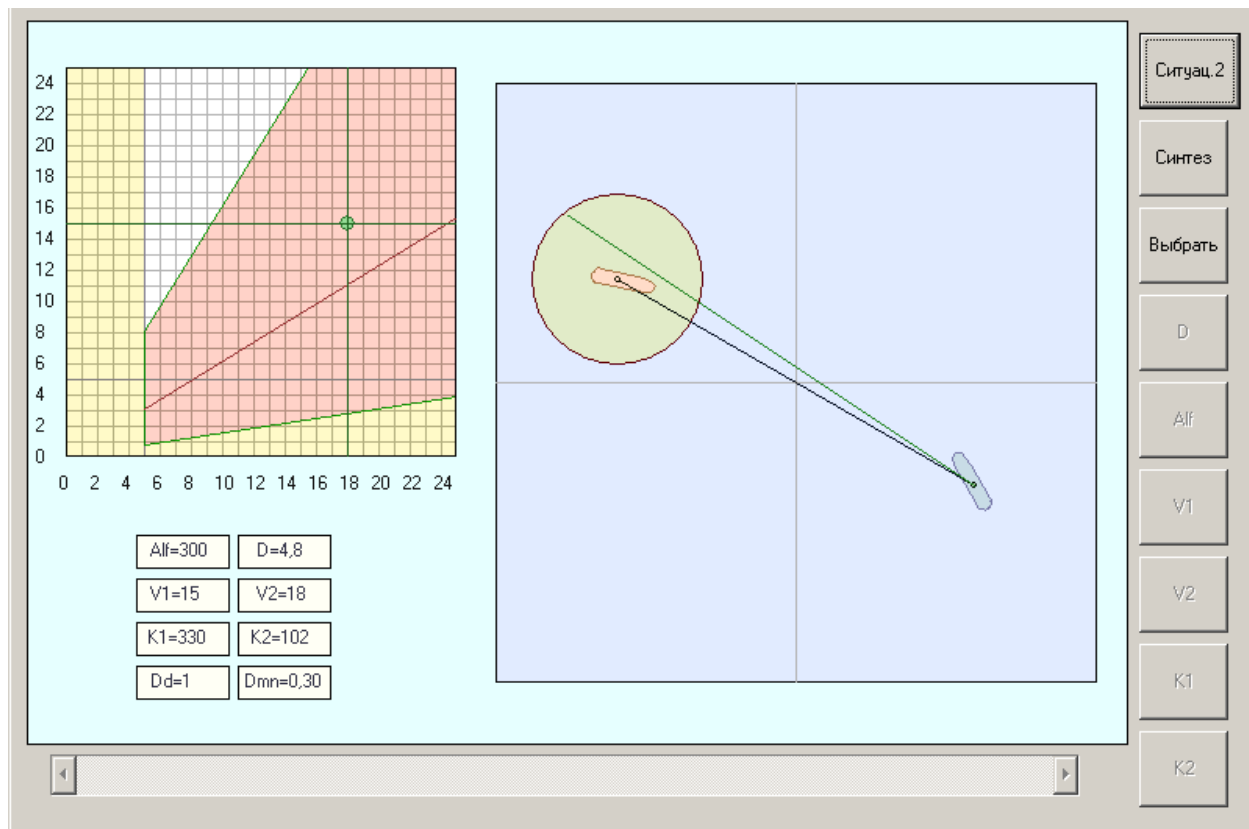


Рис. Д.21. Характеристики небезпечної початкової ситуації

Для даної ситуації вибрано маневр розходження активним гальмуванням першого судна і пасивним гальмуванням другого судна, і були визначені їх безпечні швидкості розходження для першого судна $V_{1y} = 13,8$ вуз., а для другого судна - $V_{2y} = 6,0$ вуз., як показано на рис. Д.22. При цьому також приводиться повідомлення про можливість виконання маневру розходження. Оптимізація за часом початку маневру гальмування показана на рис. Д.23, залишаючи незмінними вибрані швидкості розходження обох суден.

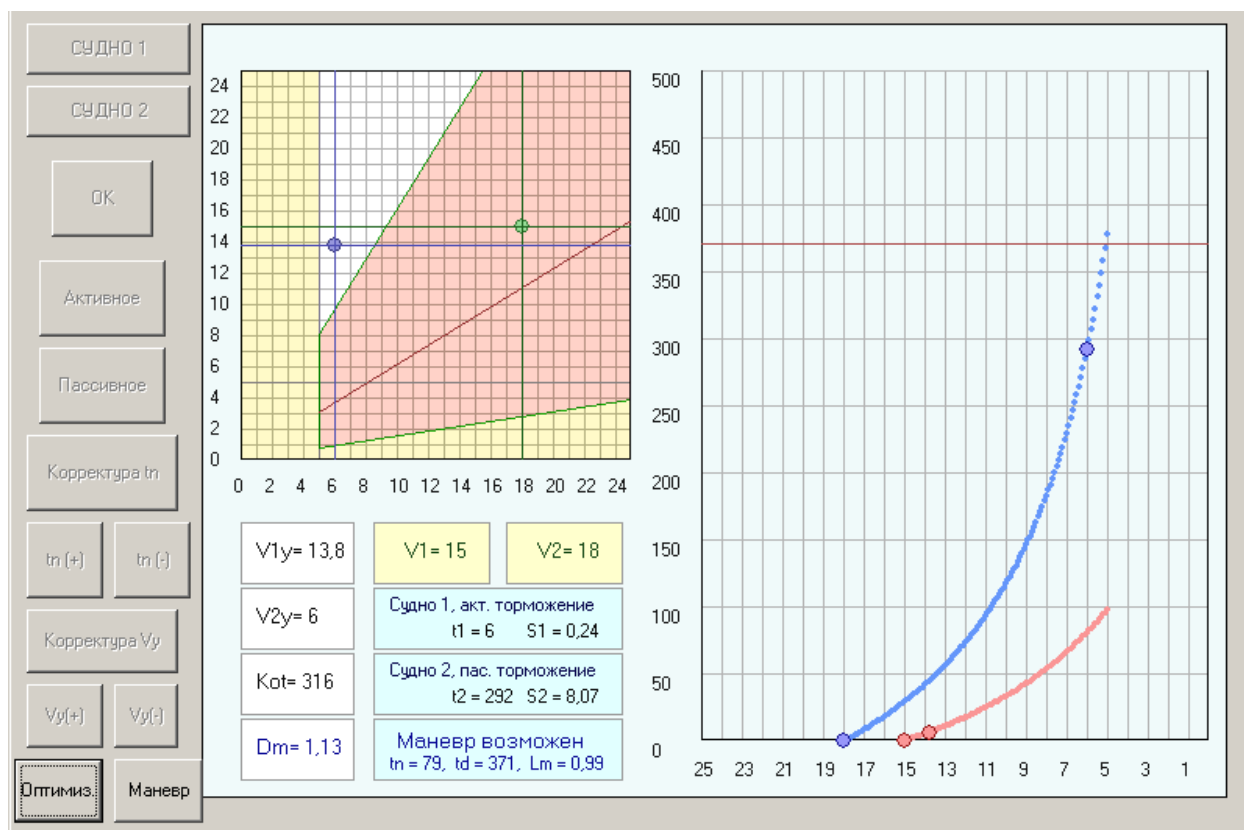


Рис. Д.22. Характеристики оптимального маневру розходження

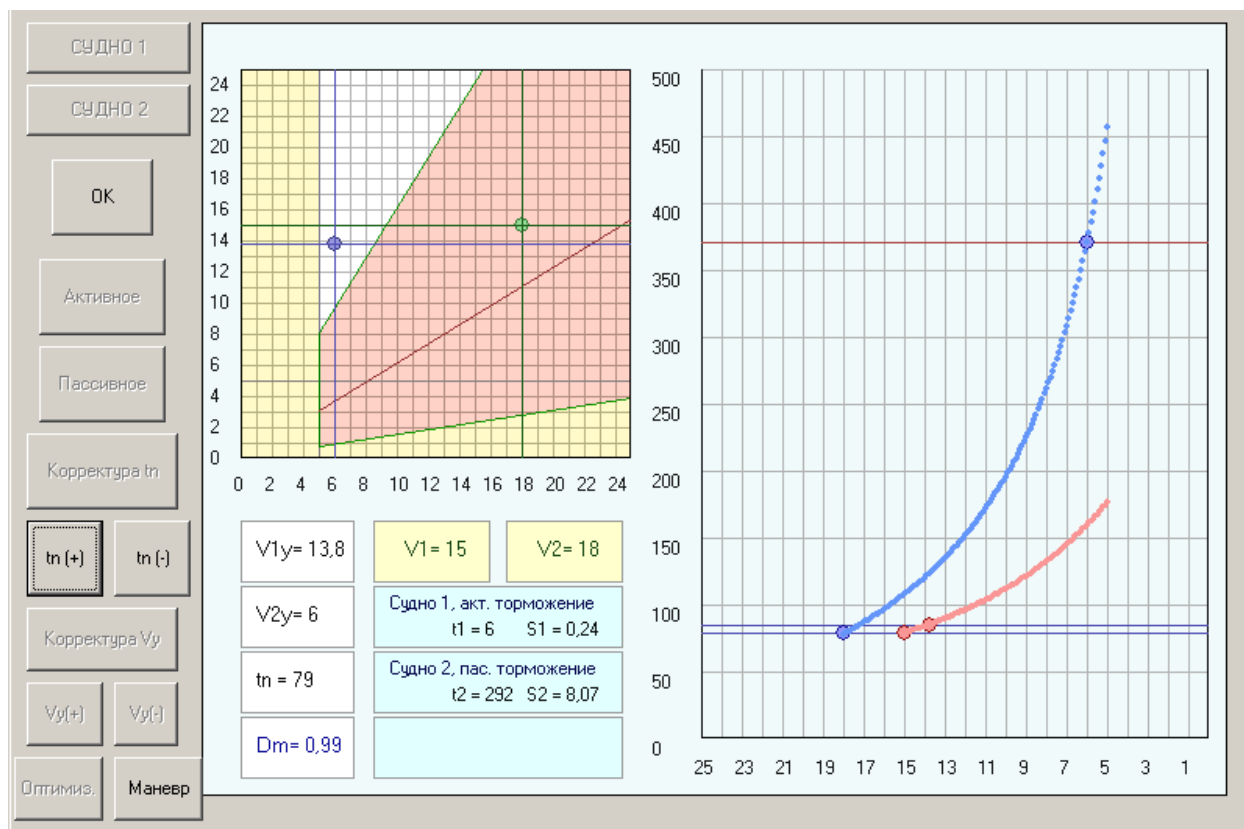


Рис. Д.23. Оптимізація часу початку маневру

Для програвання маневру розходження потрібно скористатися клавішею «Маневр», в результаті чого на моніторі відображається початкова ситуація небезпечного зближення з значенням її параметрів, а також значення часу початку гальмування суден, часу закінчення перехідного процесу і часу найкоротшого зближення, як показано на рис. Д.24. Для імітаційного моделювання маневру розходження необхідно ще раз скористатися клавішею «Маневр» і процес розходження відображається на лівій частині екрану у відносному русі, а на правій частині - в істинному русі.

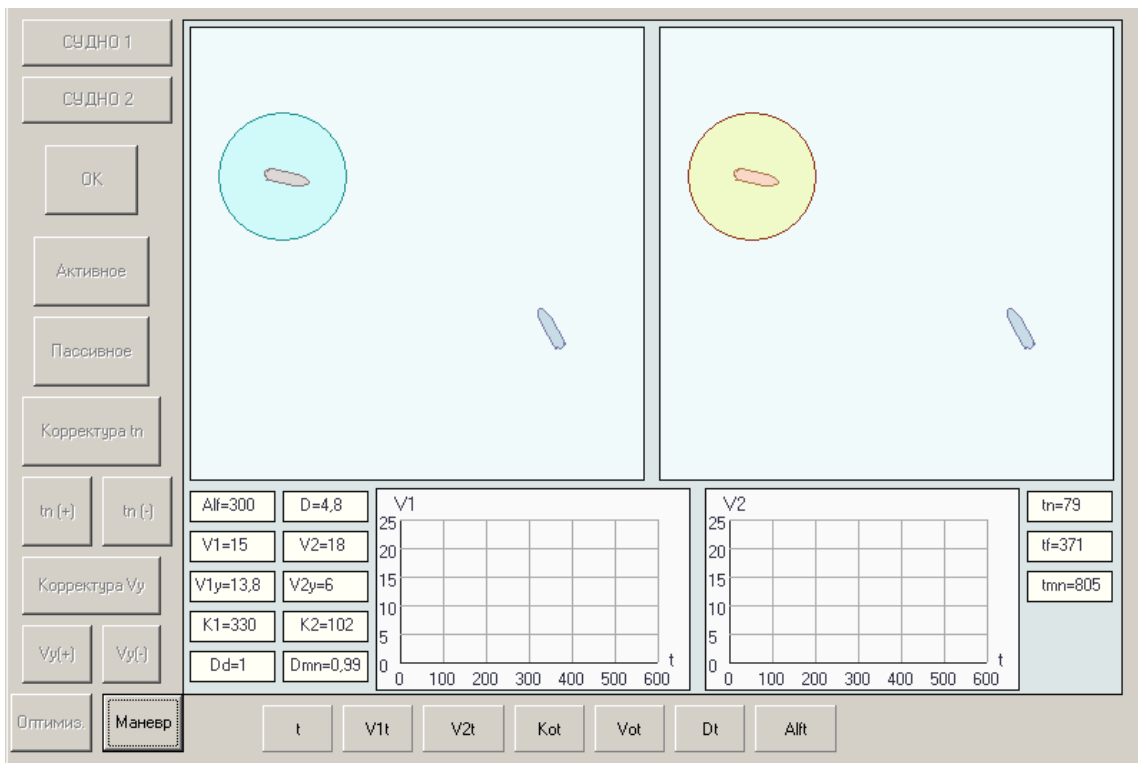
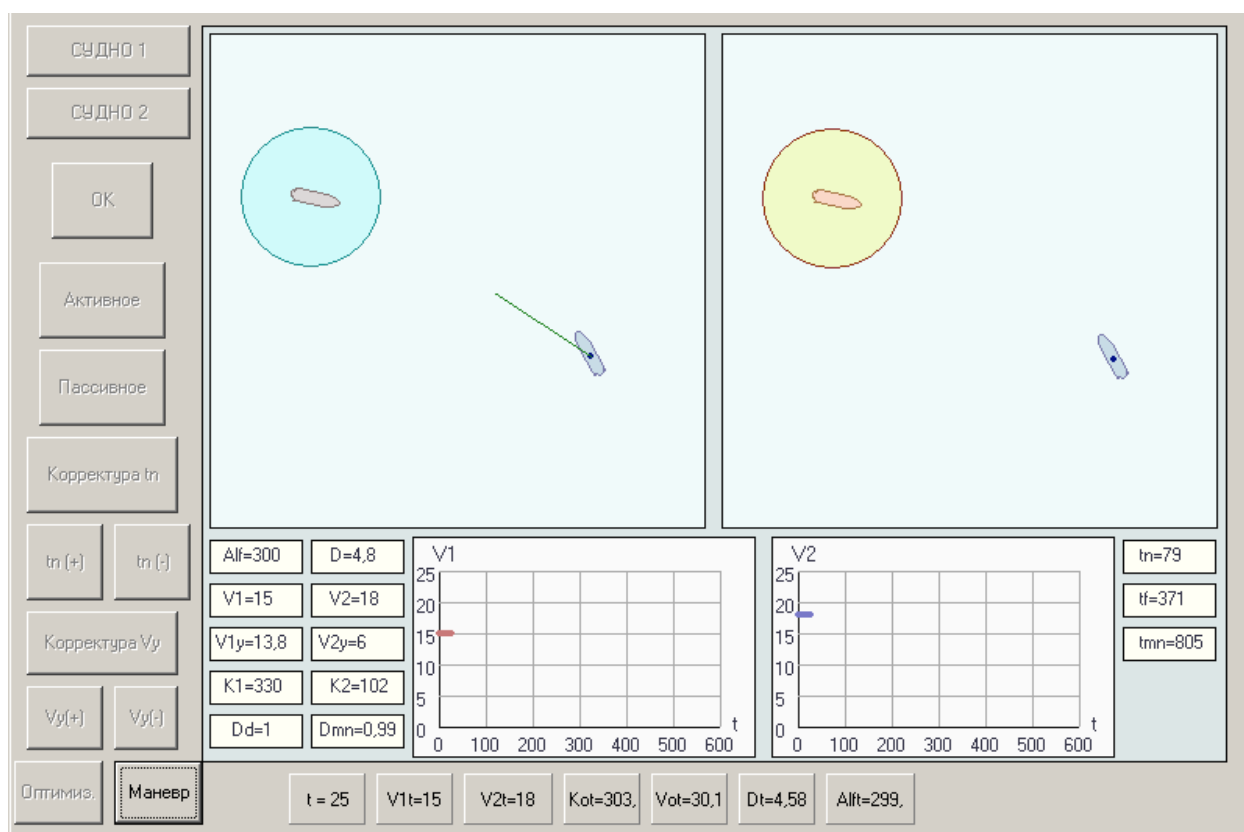
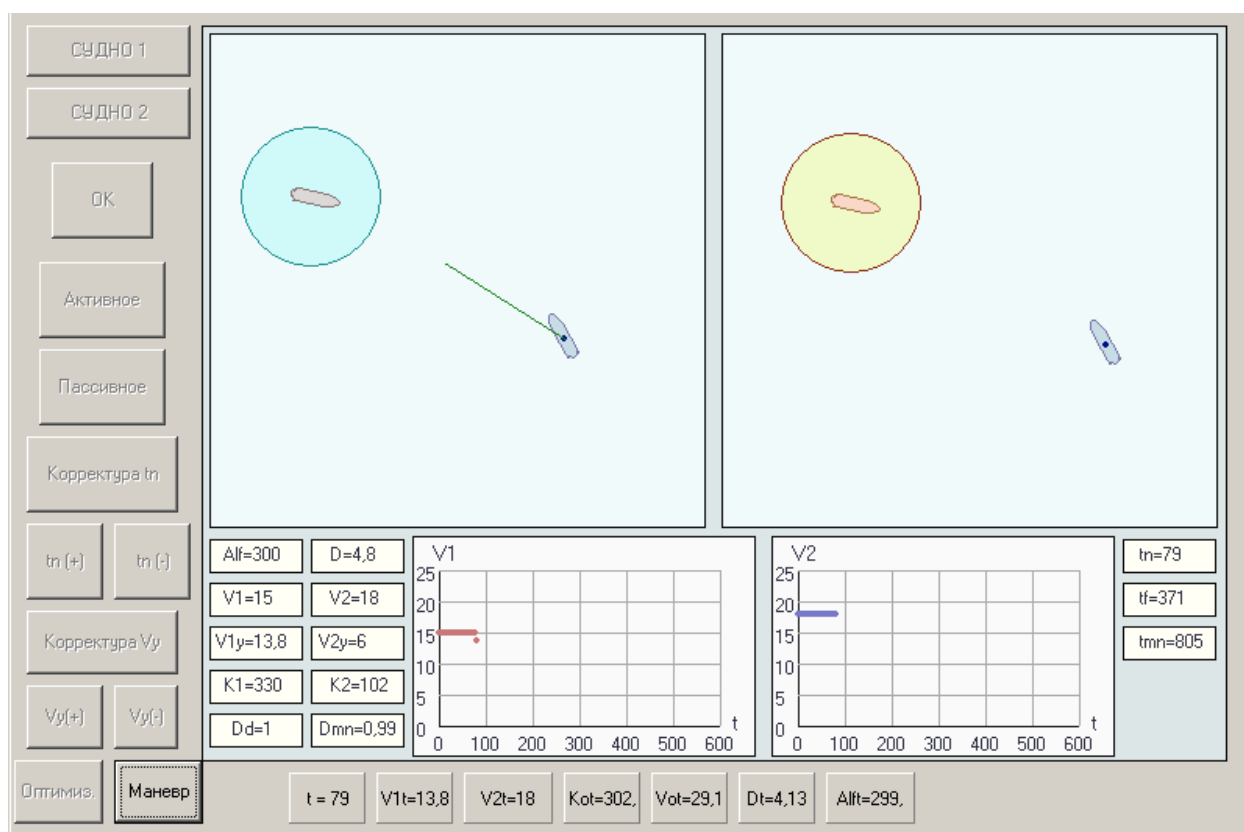


Рис. Д.24. Початок процесу розходження

Графіки залежності швидкостей суден від поточного часу відображаються в нижній частині екрану монітору (рис. Д.25), причому на рис. Д.25 показано стан процесу розходження на 25 с. Процес розходження на 79 с, коли починається гальмування суден, відображено на рис. Д.26. Завершення гальмування першого судна, яке тривало 6 с, показане на рис. Д.27, а на рис. Д.28 – закінчення гальмування другого судна.

Рис. Д.25. Стан процесу розходження на $t = 25$ сРис. Д.26. Процес розходження на початок гальмування $t = 79$ с

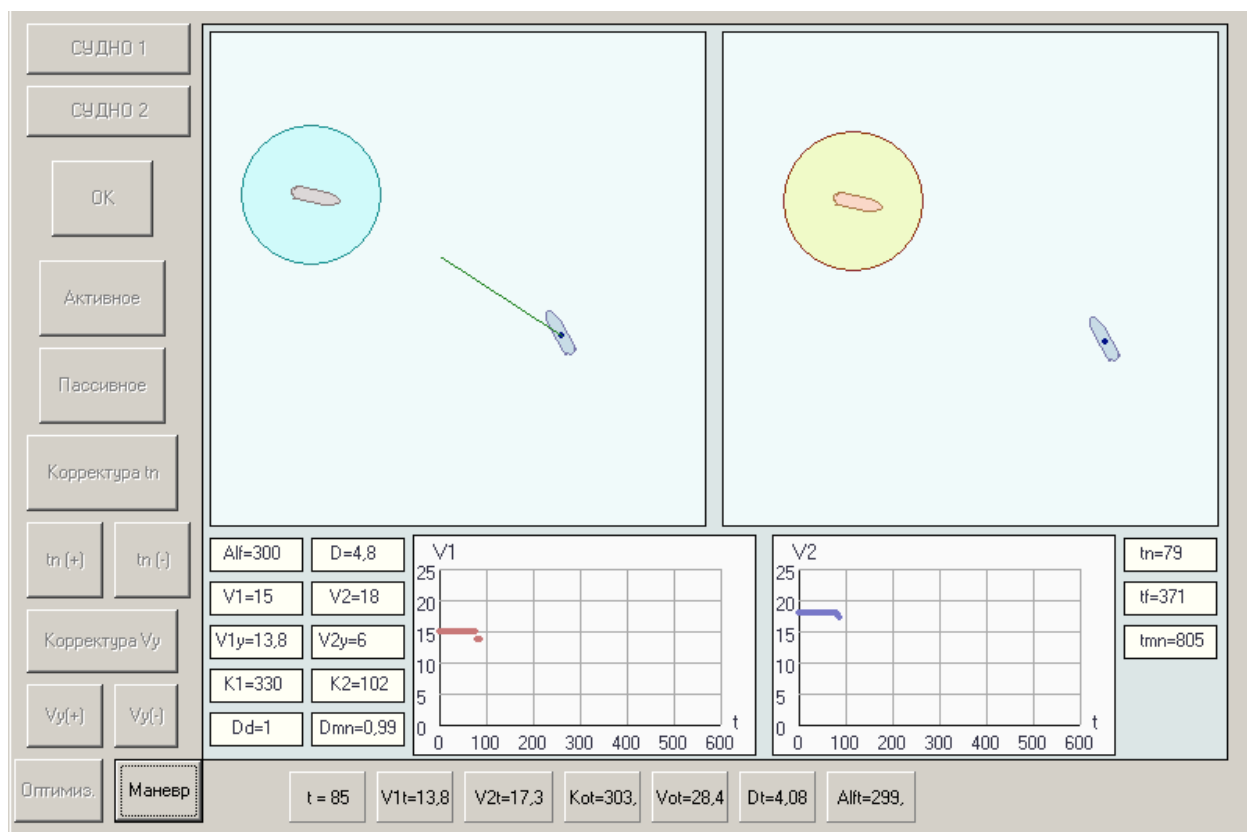


Рис. Д.27. Момент часу $t=85$ с закінчення гальмування першого судна

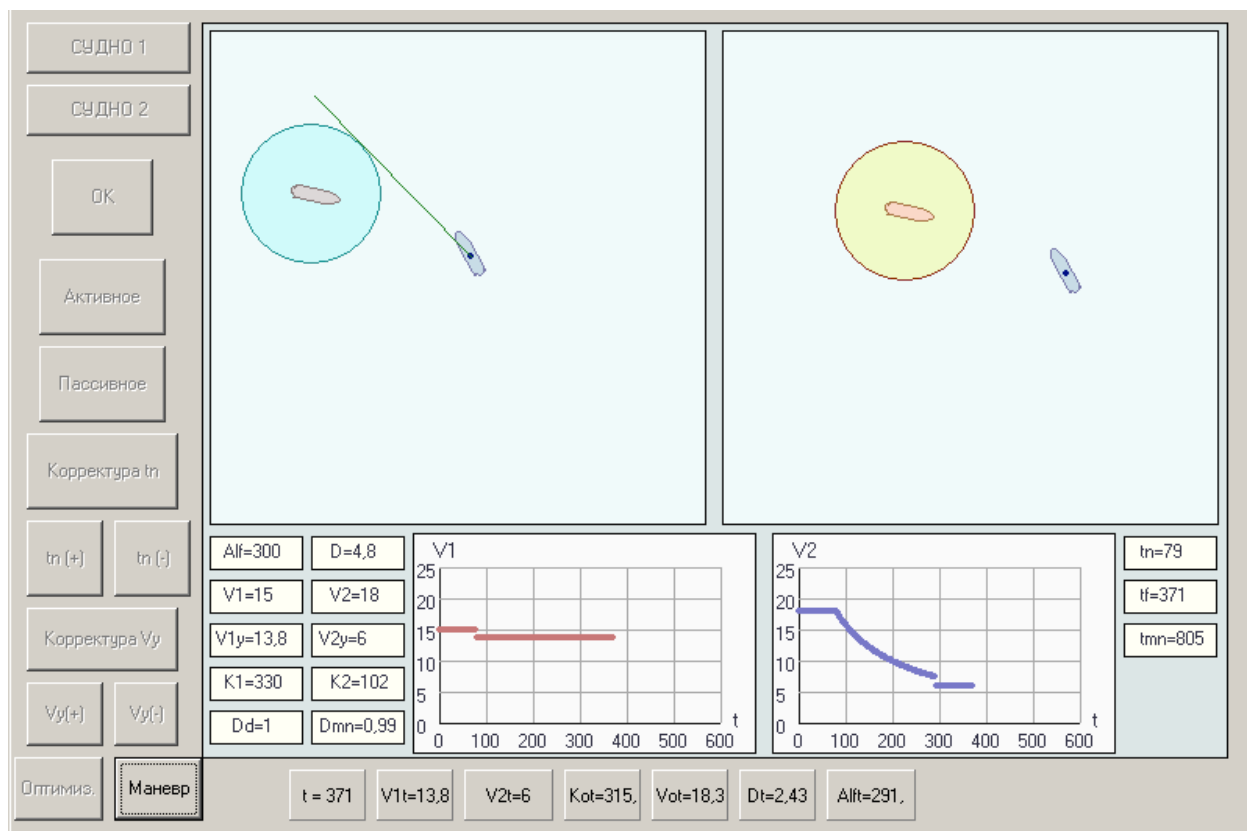


Рис. Д.28. Момент часу $t=371$ с закінчення гальмування другого судна

Після завершення гальмування до моменту часу найкоротшого зближення, що дорівнює 805 с, судна продовжують слідувати постійними швидкостями розходження $V_{1y} = 13,8$ вуз. і $V_{2y} = 6,0$ вуз., як показано на рис. Д.29, причому дистанція найкоротшого зближення складає 0,99 милі і дорівнює гранично допустимій дистанції.

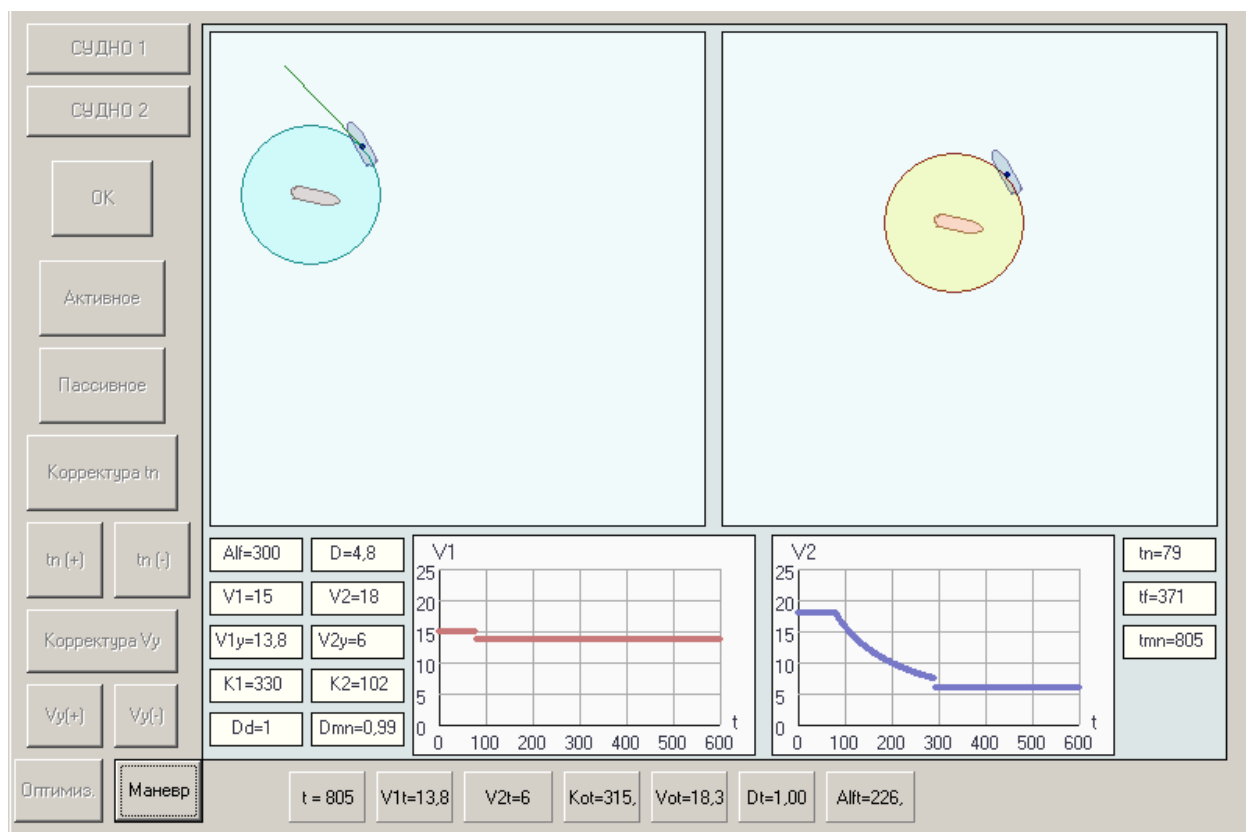


Рис. Д.29. Процес розходження в момент найкоротшого зближення суден

На рис. Д.30 показана наступна ситуація для програвання маневру розходження суден зниженням їх швидкості активним гальмуванням, характеристики якої представлені на цьому ж рисунку. Параметри оптимального маневру розходження для початкового моменту часу гальмування приведені на рис. Д.31. У даному прикладі розглянемо вибір оптимальних швидкостей розходження суден в разі початку процесу їх гальмування в нульовий момент часу. Для цього клавішами «Оптиміз.» і

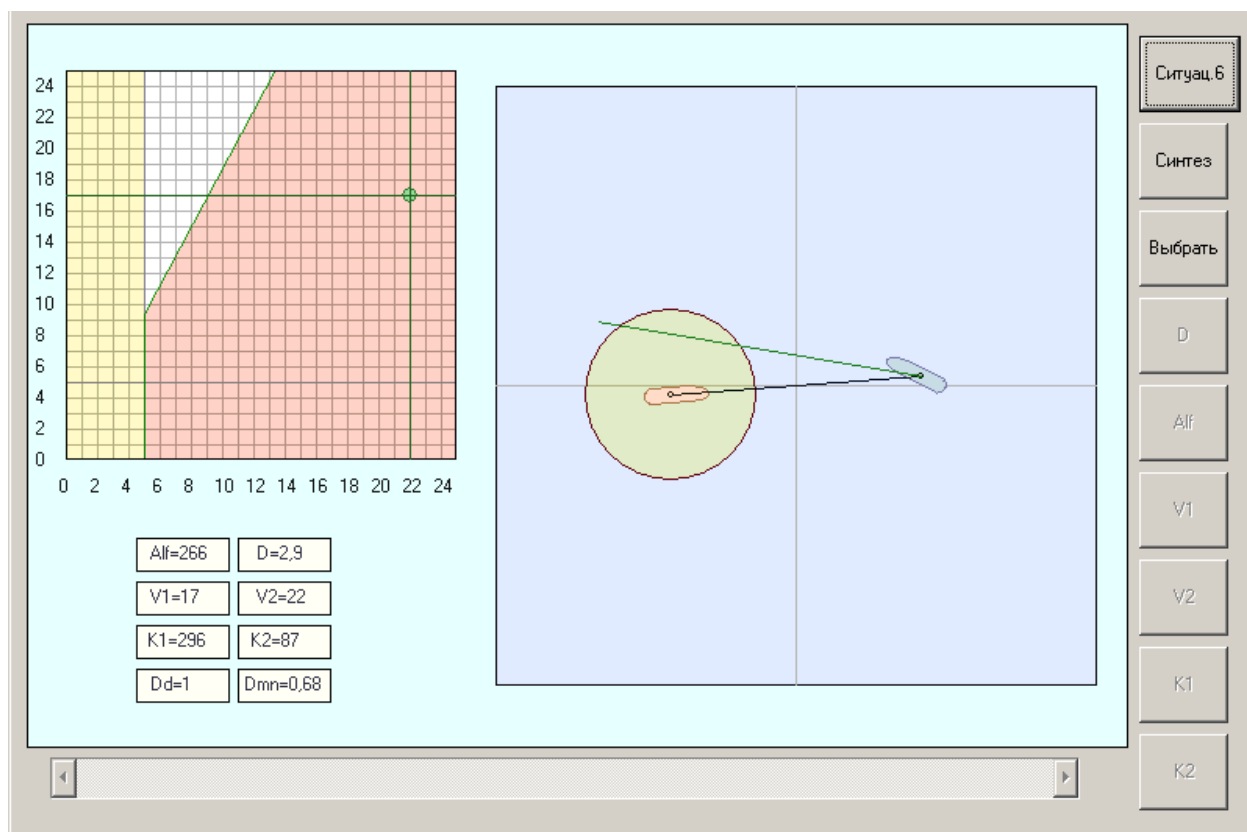


Рис. Д.30. Характеристики наступної небезпечної ситуації

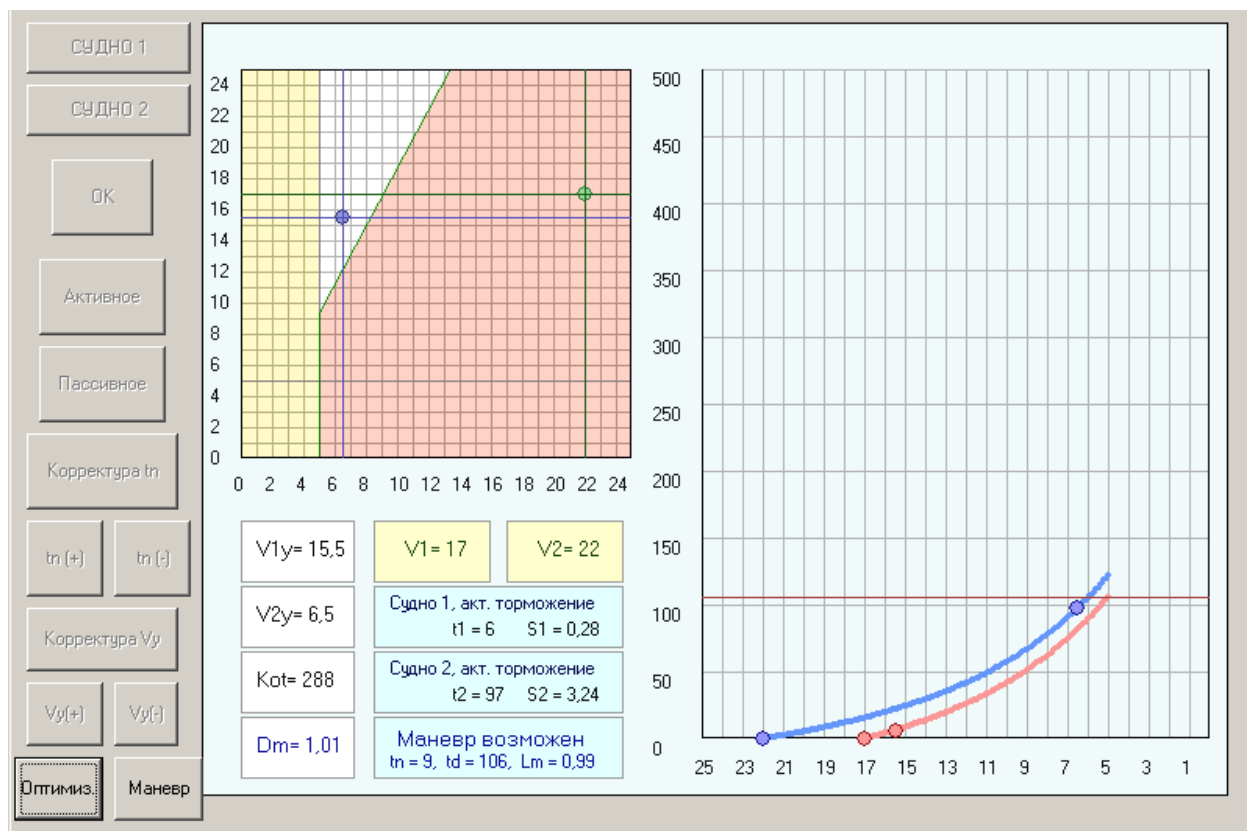


Рис. Д.31. Оптимальний маневр розходження початковим часом

«Коректура V_y », вибирається режим визначення оптимальних швидкостей розходження суден, що показано на рис. Д.32. Спочатку клавішею «Судно 1» вибирається перше судно для коректури його швидкості розходження. Для цього за допомогою клавіші « $V_y (-)$ » вибирається швидкість $V_{1y} = 14,5$ вуз., як показано на рис. Д.33. Положення горизонтальної лінії індикатора відповідає даному відліку швидкості. Після використання клавіші «Судно 2» вибирається друге судно і, як випливає з рис. Д.34, вибрана швидкість дорівнює $V_{2y} = 6,5$ вуз.

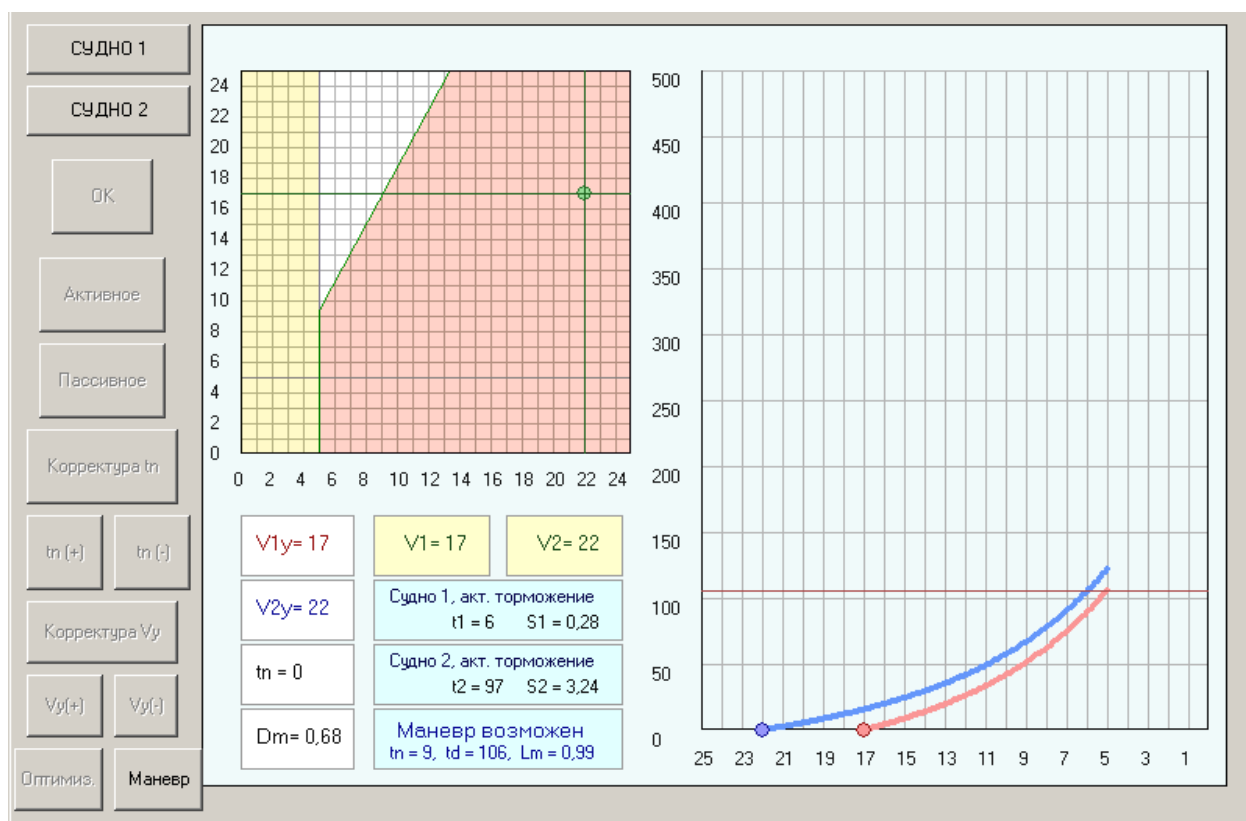


Рис. Д.32. Режим оптимізації швидкостей розходження суден

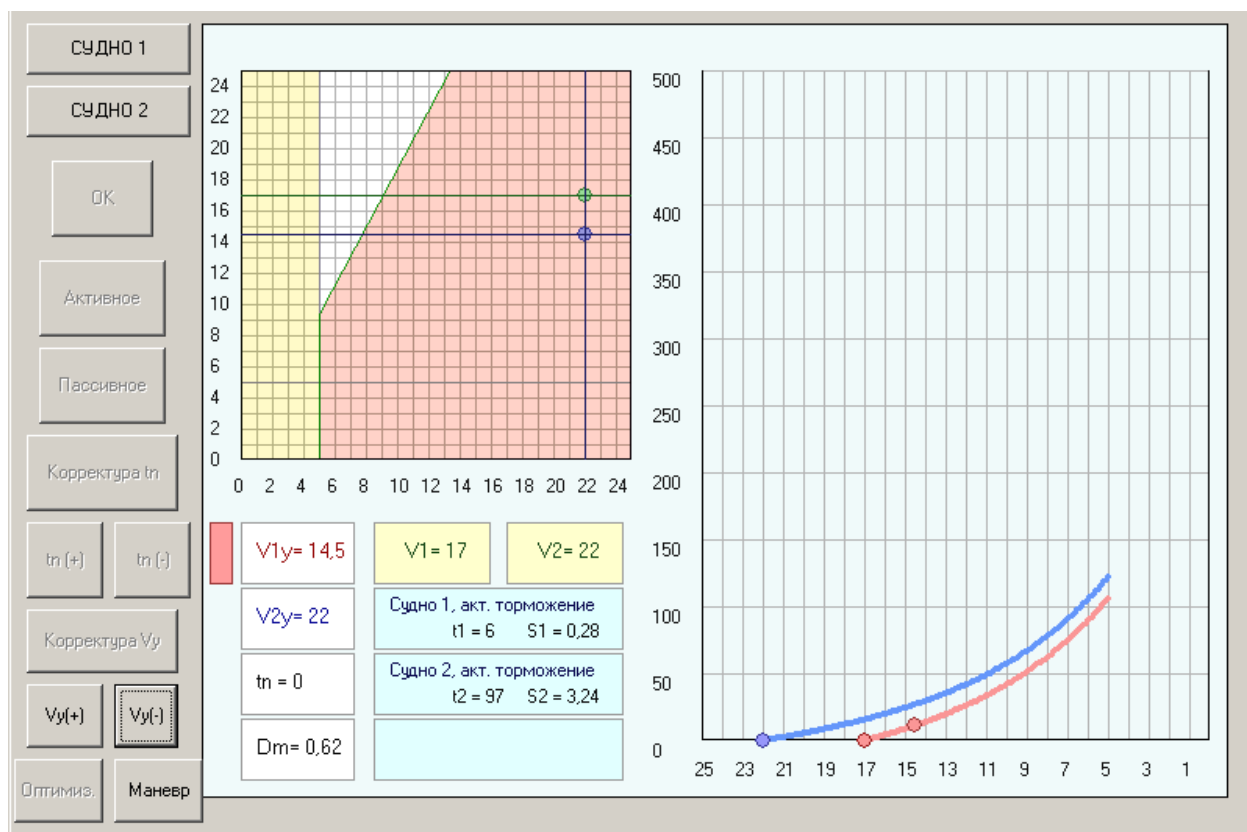


Рис. Д.33. Вибір швидкості розходження першого судна

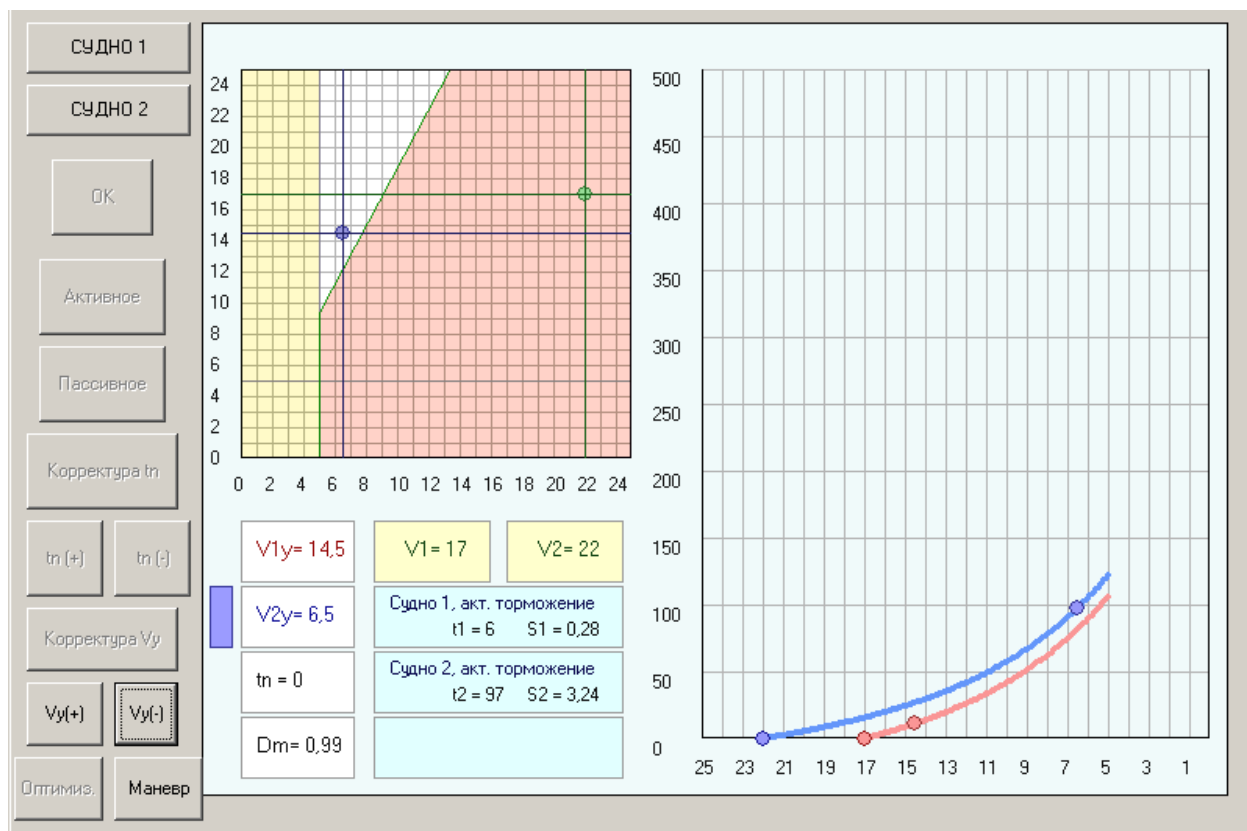


Рис. Д.34. Вибір швидкості розходження другого судна

Імітаційне моделювання одержаного маневру розходження починається з моменту, відображеного на рис. Д.35. Також виводяться параметри оптимального маневру розходження з вибраними швидкостями $V_{2y} = 6,5$ вуз. і $V_{1y} = 14,5$ вуз., та моментом часу початку маневру ухилення $t_n = 0$ с.

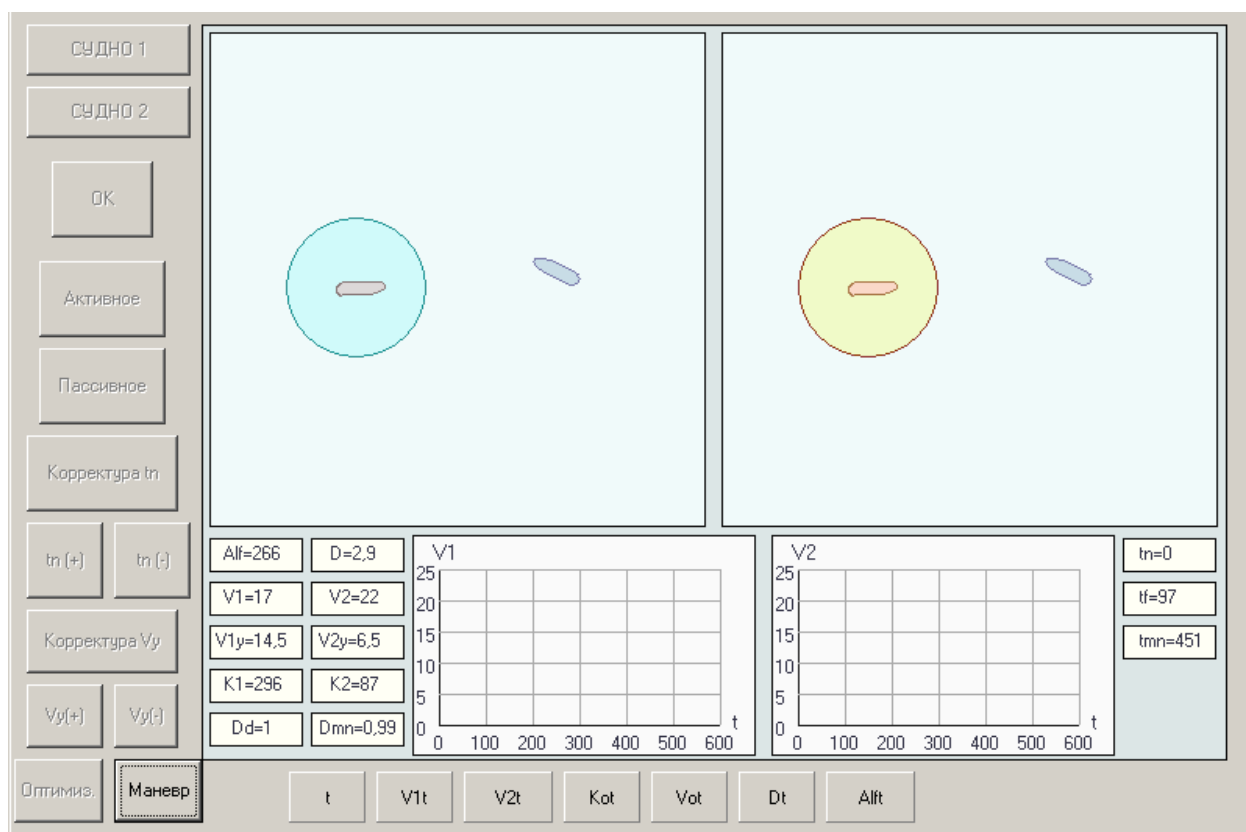


Рис. Д.35. Початковий стан маневру розходження

Гальмування суден починається в нульовий момент часу. Через 11 с перше судно завершує активне гальмування, швидкість якого знижена до $V_{1y} = 14,5$ вуз. (рис. Д.36), а друге судно продовжує процес активного гальмування до моменту часу 98 с процесу розходження суден, коли швидкість другого судна приймає значення рівне $V_{2y} = 6,5$ вуз., що показано на рис. Д.37. Друге судно закінчує процес гальмування в цей момент часу, а далі судна зближуються на понижених швидкостях розходження.

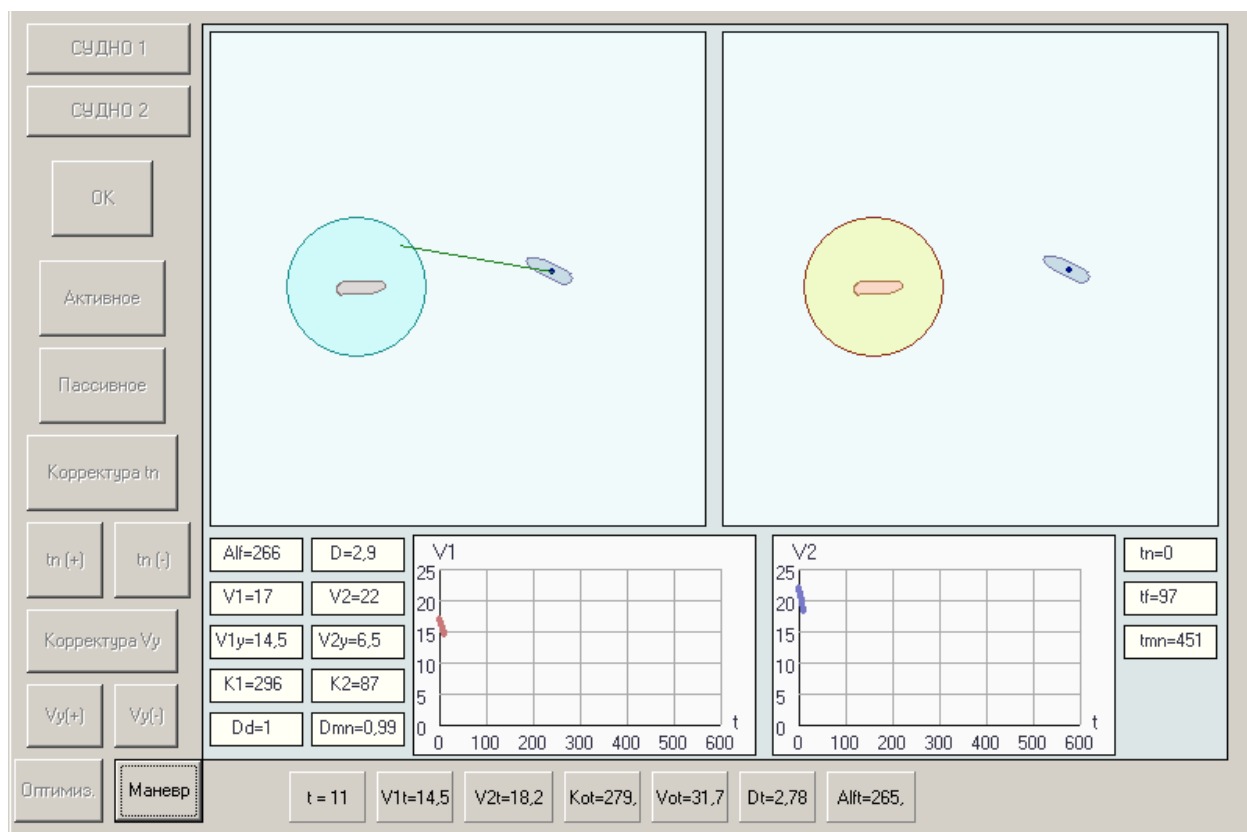


Рис. Д.36. Момент часу $t = 11$ с завершения гальмування першого судна

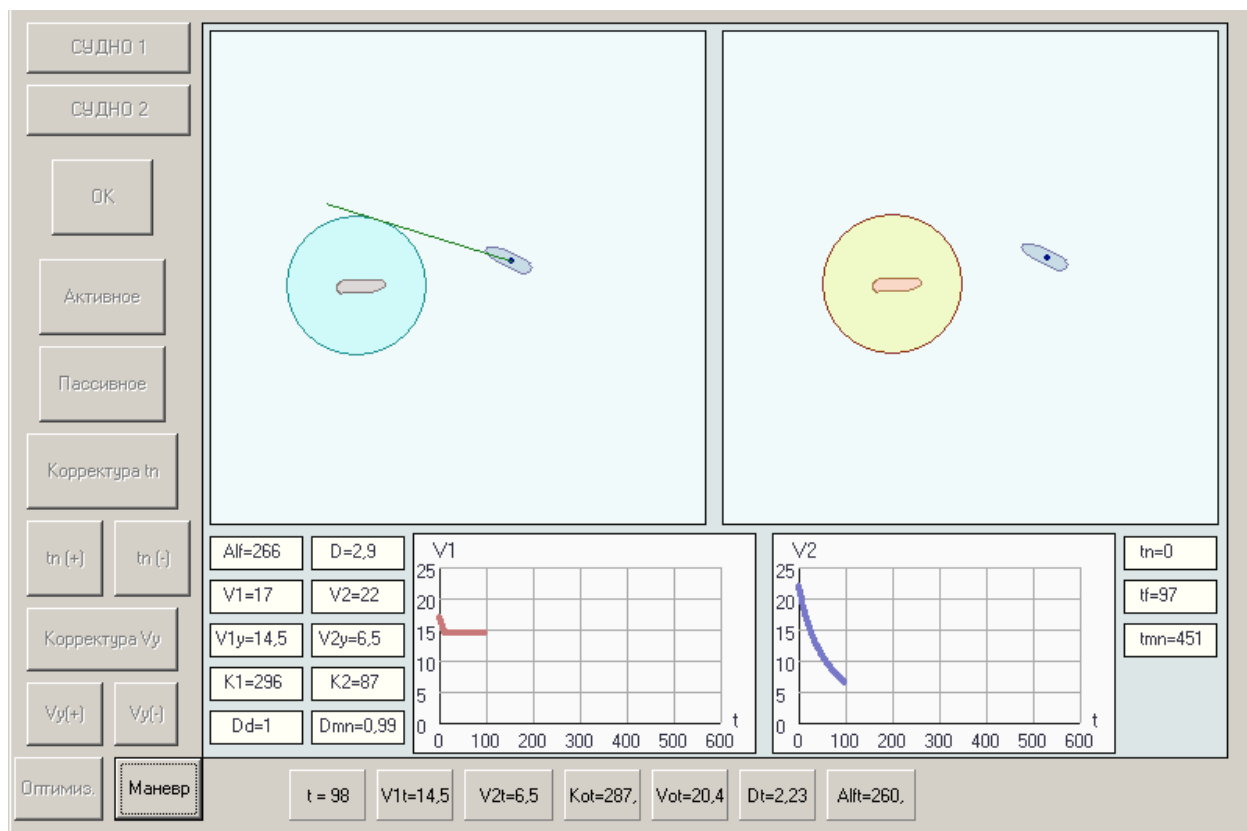


Рис. Д.37. Завершення гальмування другого судна в момент часу $t = 98$ с

У момент часу $t=451$ с судна досягають дистанції найкоротшого зближення 0,99 милі, яка дорівнює гранично - допустимій дистанції, що показано на рис. Д.38.

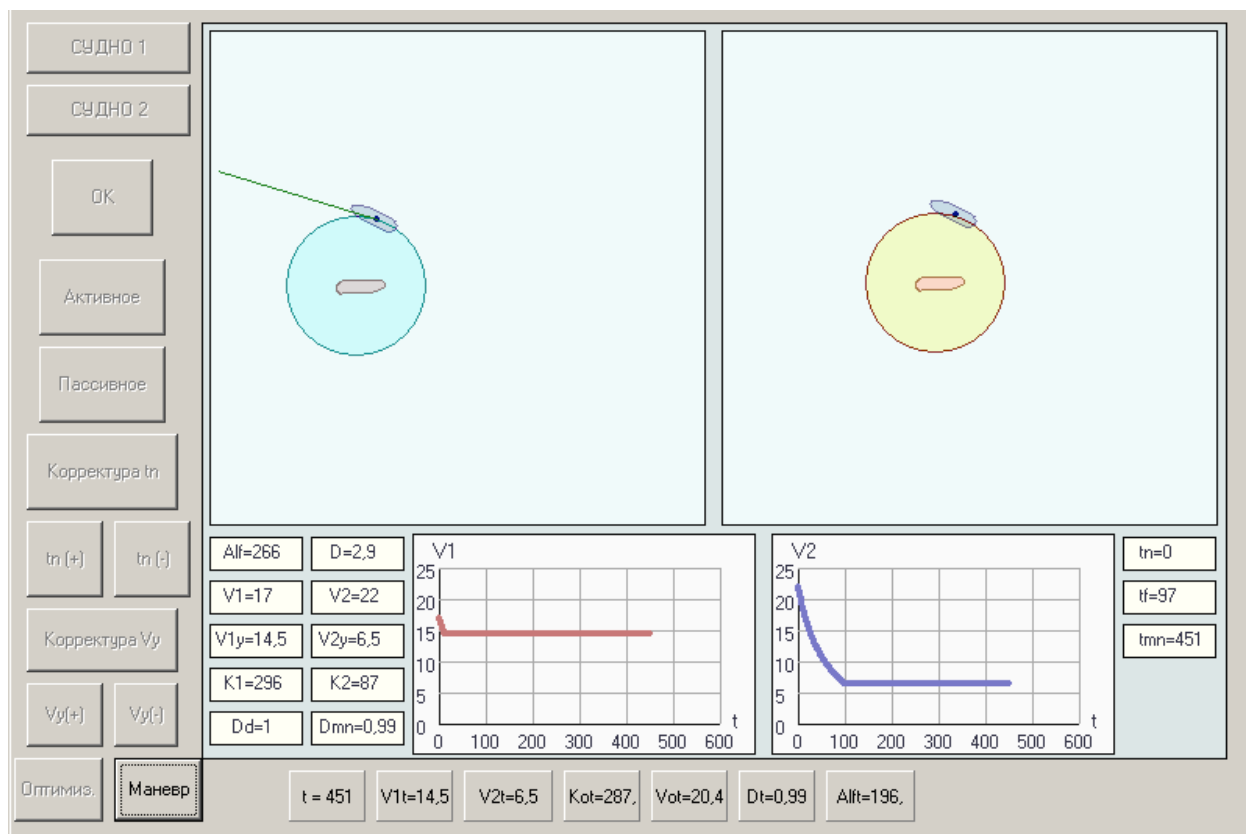


Рис. Д.38. Момент часу $t = 451$ с найкоротшого зближення суден

Завершальна ситуація небезпечного зближення з маневром розходження швидкостей суден пасивним гальмуванням оптимізацією маневру розходження швидкостями показана на рис. Д.39. Програмою розраховано оптимальний маневр розходження вибором моменту часу початку гальмування, як показано на рис. Д.40. Режимом корекції швидкостей розходження для першого судна вибрана швидкість $V_{1y} = 10,0$ вуз (рис. Д.41), а для другого судна, як видно з рис. Д.42, вибрана швидкість $V_{2y} = 15,5$ вуз.

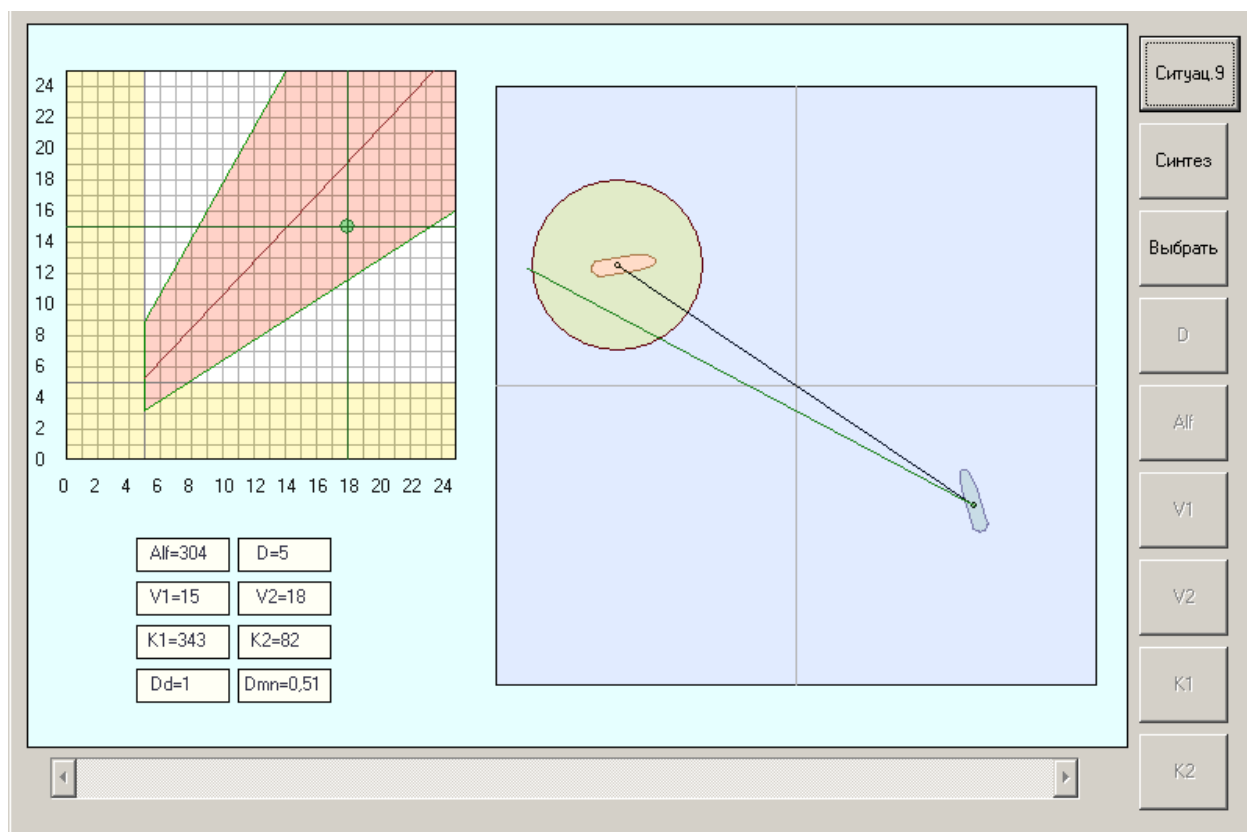


Рис. Д.39. Характеристики завершальной небезпечної ситуації

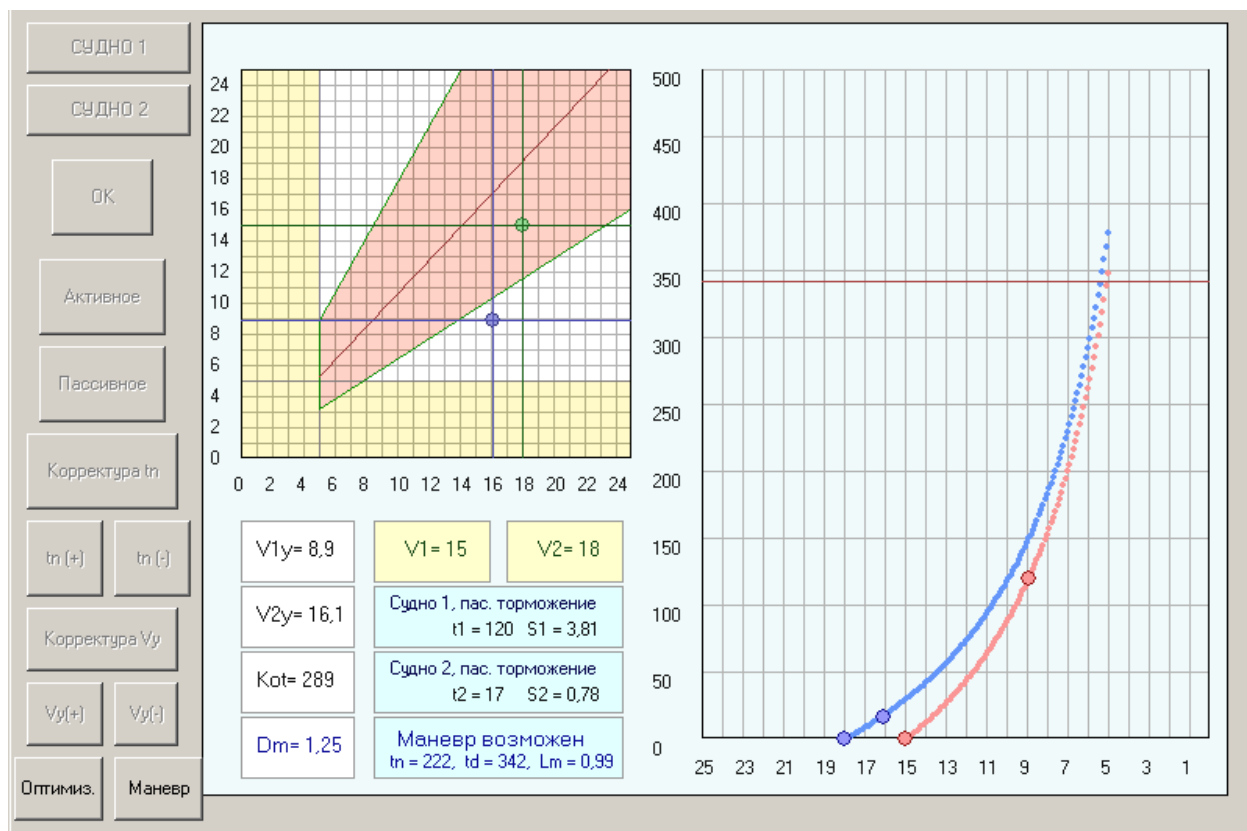


Рис. Д.40. Маневр оптимального розходження початковим часом

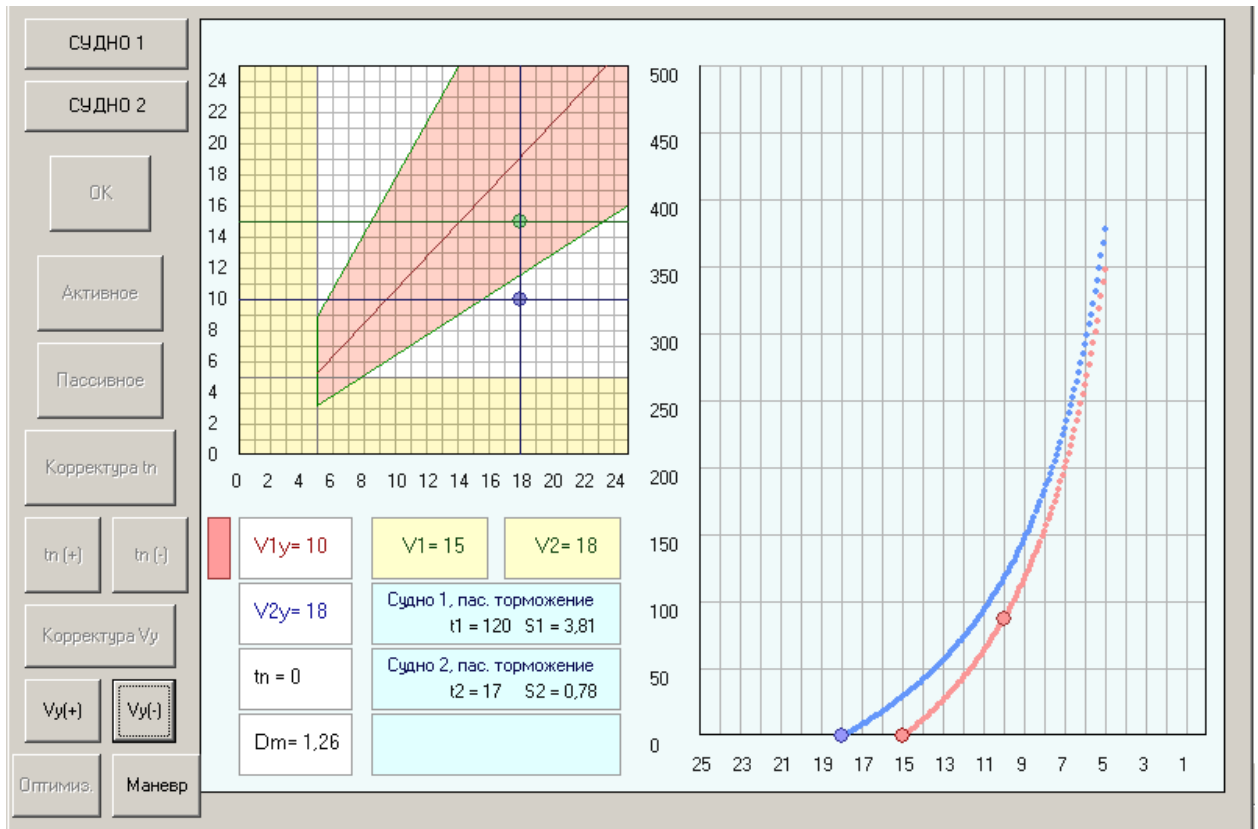


Рис. Д.41. Визначення оптимальної швидкості розходження першого судна

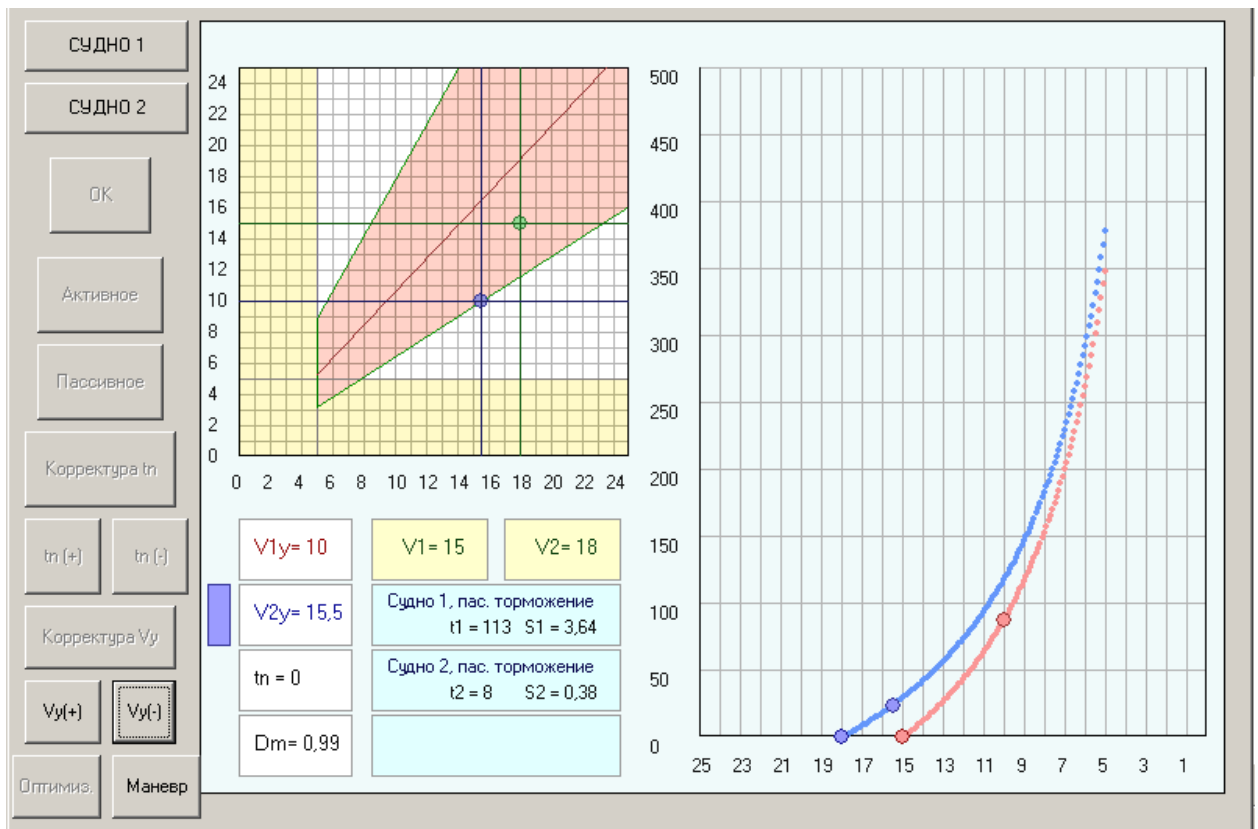


Рис. Д.42. Вибір оптимальної швидкості розходження другого судна

Імітаційне моделювання було проведене для вибраного маневру розходження, а початковий стан маневру розходження показаний на рис. Д.43.

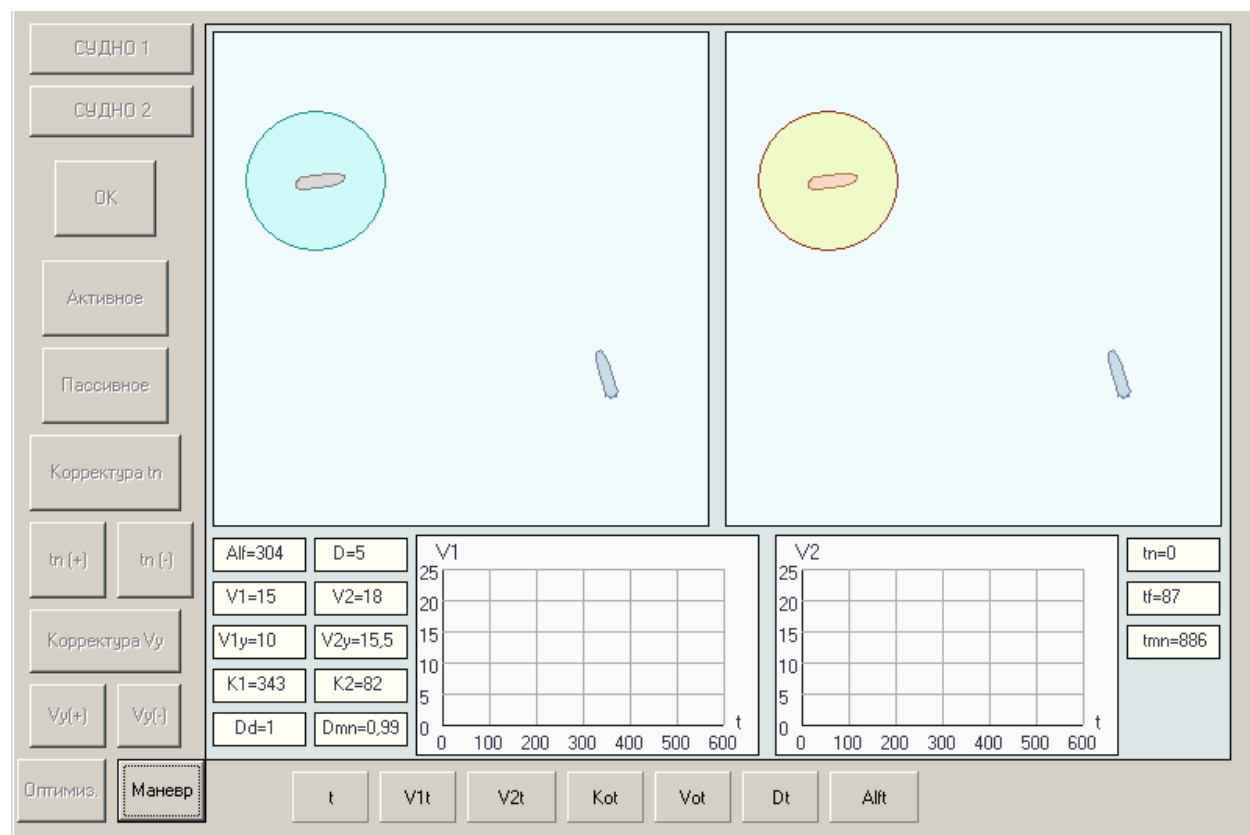


Рис. Д.43. Початковий стан маневру розходження, що імітується

На рис. Д.44 показаний процес розходження у момент часу $t = 23$ с. Друге судно в цей момент завершило процес активного гальмування, знизивши свою швидкість до величини $V_{2y} = 15,5$ вуз. і продовжує слідувати з такою швидкістю. Перше судно виконувало пасивне гальмування аж до моменту часу $t = 53$ с, поки його швидкість не досягла вибраного значення $V_{1y} = 10,0$ вуз, (рис. Д.45). Після перехідного процесу зниження швидкостей обидва судна слідують з постійними значеннями вибраних швидкостей розходження до моменту часу найкоротшого зближення $t = 886$ с, як показано на рис. Д.46. Дистанція найкоротшого зближення у цей момент часу дорівнює 0,99 милі.

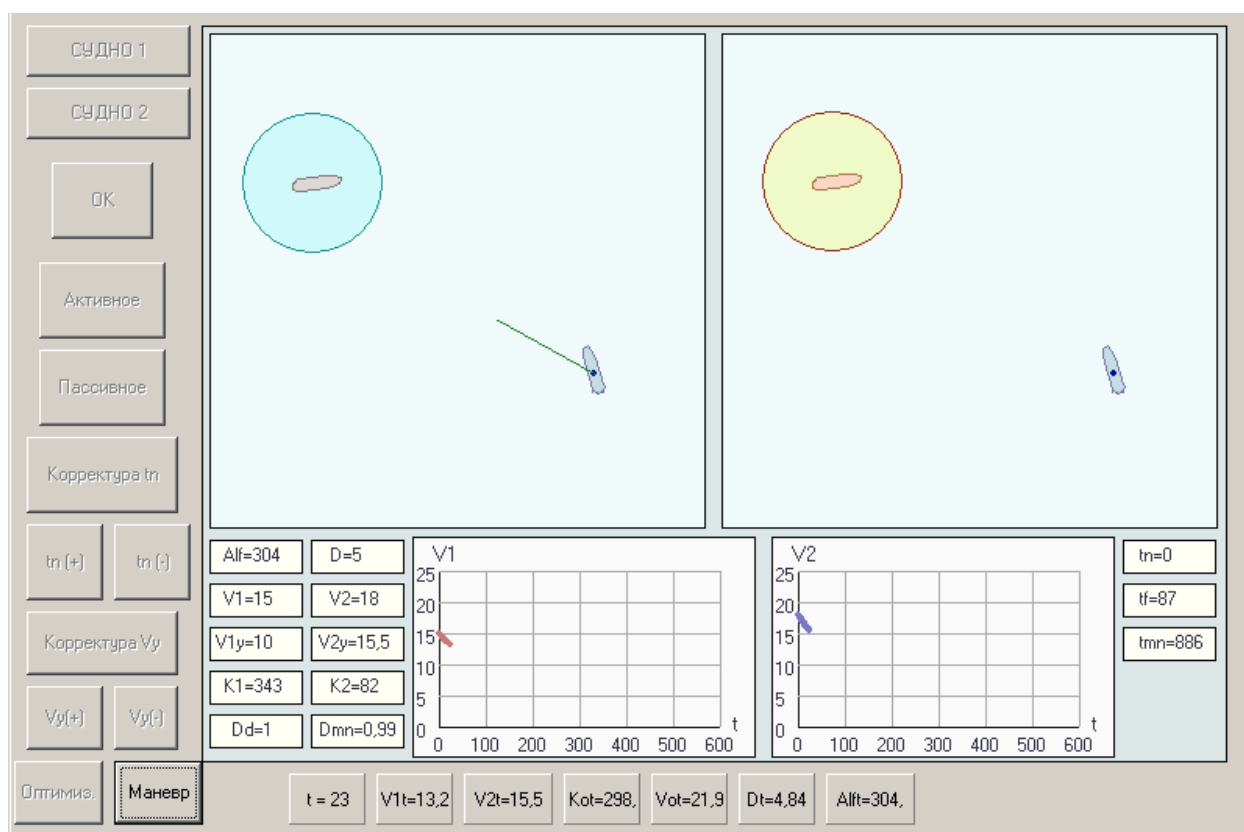


Рис. Д.44. Момент часу $t = 23$ с завершения гальмування другого судна

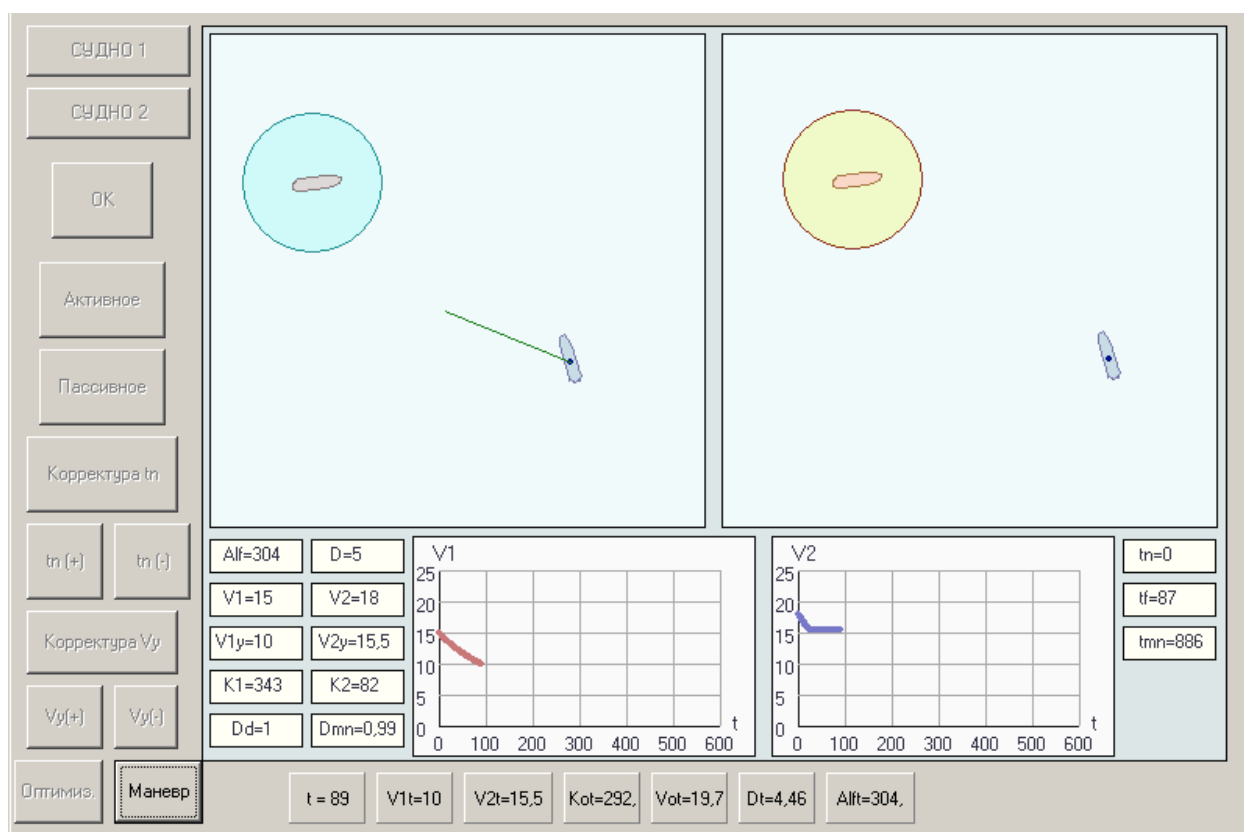


Рис. Д.45. Момент часу $t = 89$ с завершения гальмування першого судна

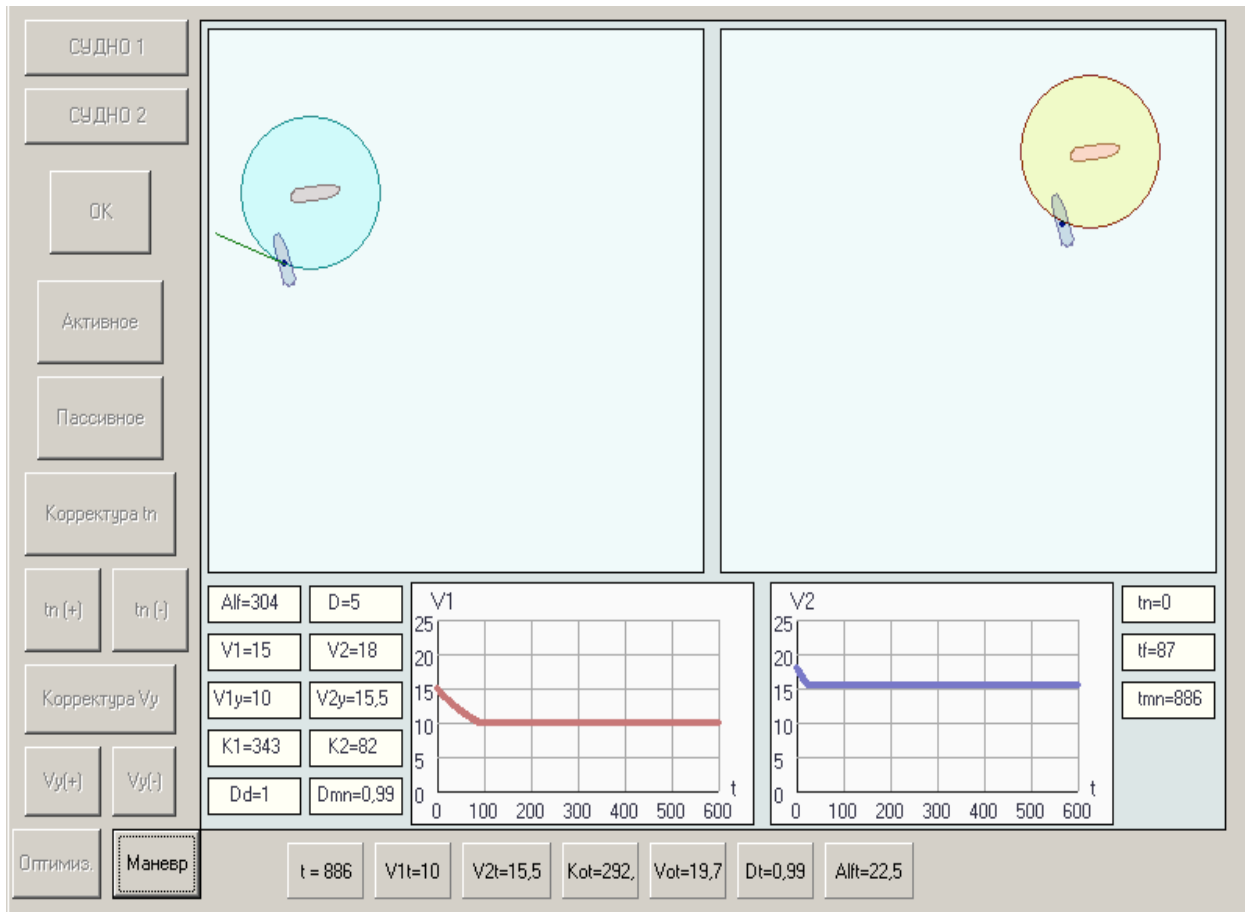


Рис. Д.46. Стан найкоротшого зближення суден

Як видно, імітаційне моделювання підтвердило коректність запропонованого методу розходження суден зниженням їх швидкостей, використовуючи для вибору маневру область небезпечних швидкостей.

Д.3. Імітаційне моделювання процесу розходження з використанням області неприпустимих значень курсів першого судна і швидкостей другого судна.

Для імітаційного моделювання процесу розходження з використанням області неприпустимих значень курсів першого судна і швидкостей другого судна розрахунок параметрів маневру розходження проводиться з урахуванням моделі обертального руху першого судна з постійною кутовою швидкіс-

ттю.

Для прикладу розглянемо першу стандартну ситуацію небезпечного зближення (рис. Д.47) з параметрами: курсом $K_c = 130^\circ$ і швидкістю $V_c = 22$ вузла судна, курсом $K_1 = 315^\circ$ і швидкістю $V_1 = 18$ вузлів другого, дистанція $D_1 = 3,2$ милі і пеленг $\alpha_1 = 140^\circ$.

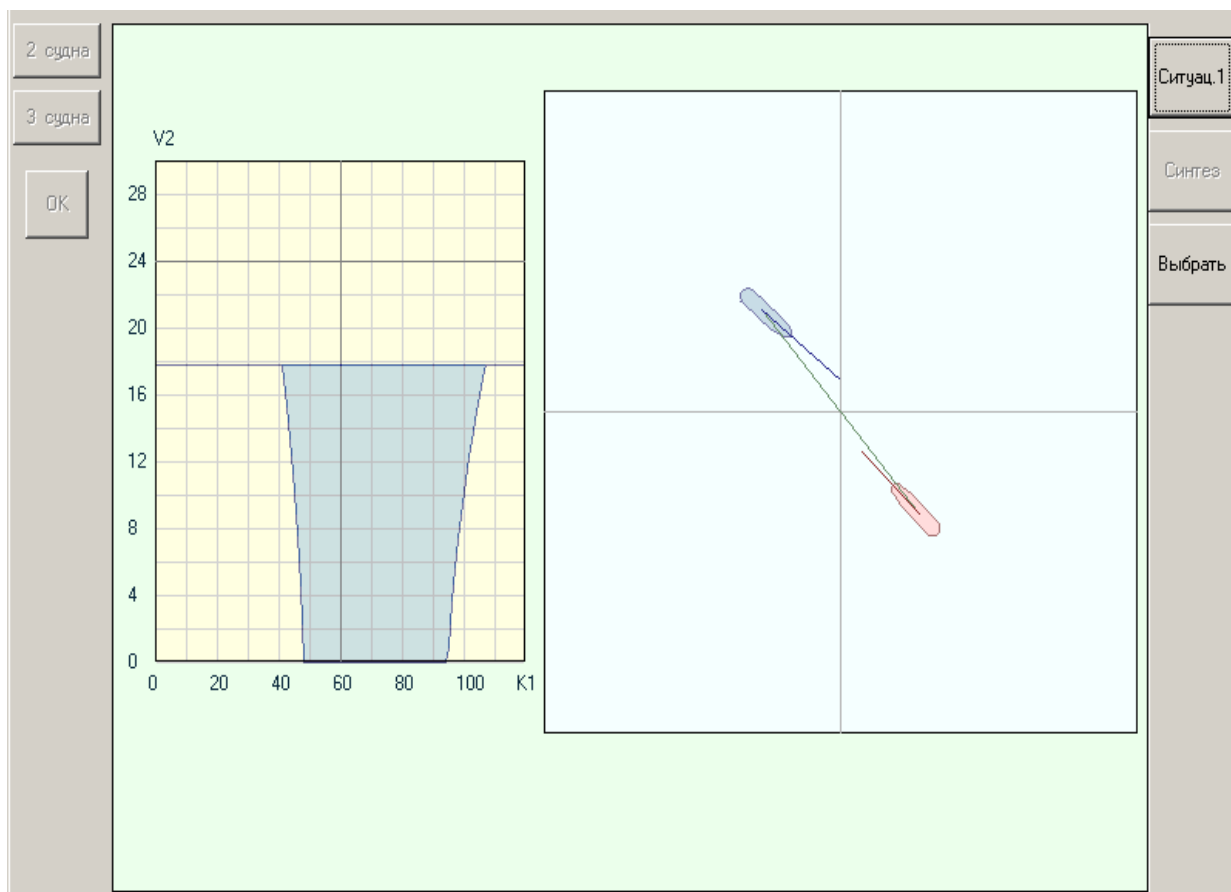


Рис. Д.47. Перша ситуація зближення двох суден

Даній ситуації, приведеній на рис. Д.48, відповідає область неприпустимих значень курсів першого судна і швидкостей другого судна, яке пасивним гальмуванням знижує швидкість. За допомогою області вибраний безпечний маневр розходження: курс ухилення першого судна 174° і швидкість розходження другого судна 14,8 вузлів.

Для програвання вибраного маневру розходження скористаємось клавішею «TIMER», після чого на інформаційні панелі виводяться дані про па-

раметри ситуації зближення, параметри маневру розходження і поточні значення параметрів процесу розходження, як показано на рис. Д.49. При цьому поточна ситуація відображається графічно. Початок маневру розходження представлений на рис. Д.49.

Перше судно починає поворот на курс ухилення 174° , а друге судно знижує швидкість пасивним гальмуванням. На 22 с процесу розходження відбувається завершення повороту першого судна, що показано на рис. Д.50. Перше судно продовжує слідувати незмінним курсом ухилення 174° .

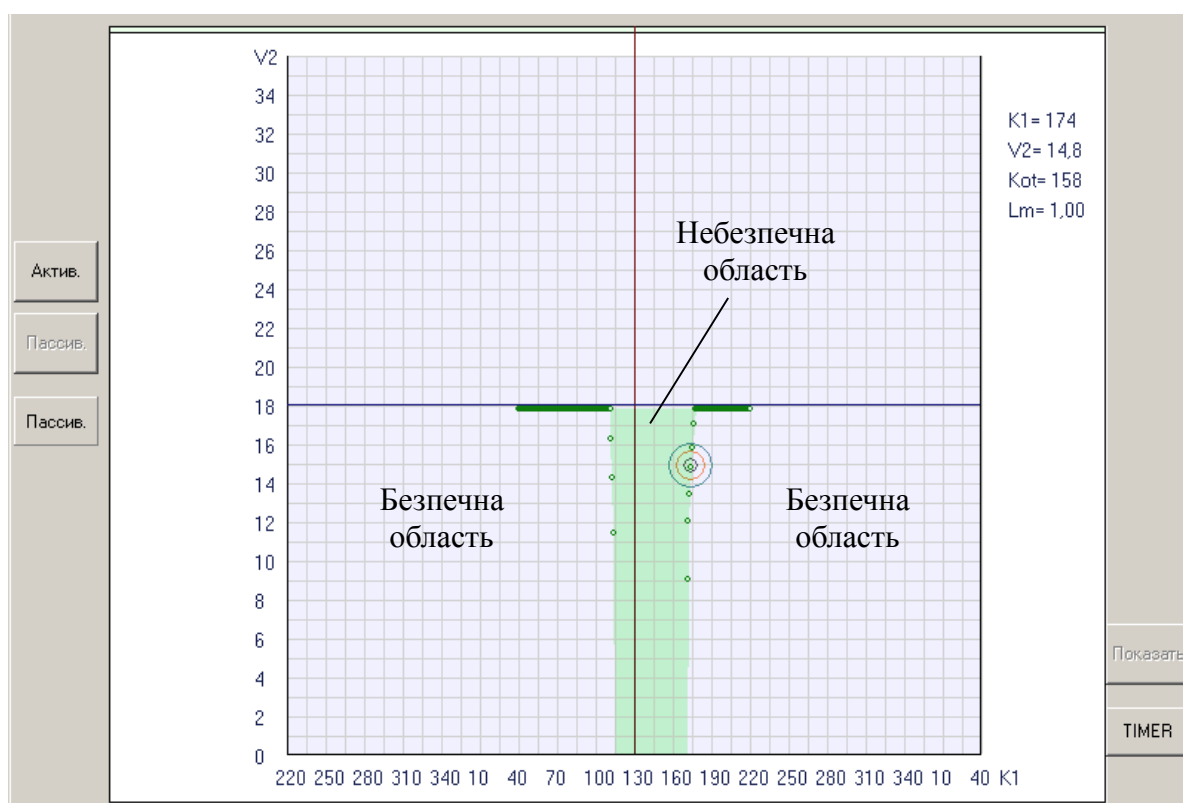


Рис. Д.48. Вибір безпечного маневру розходження

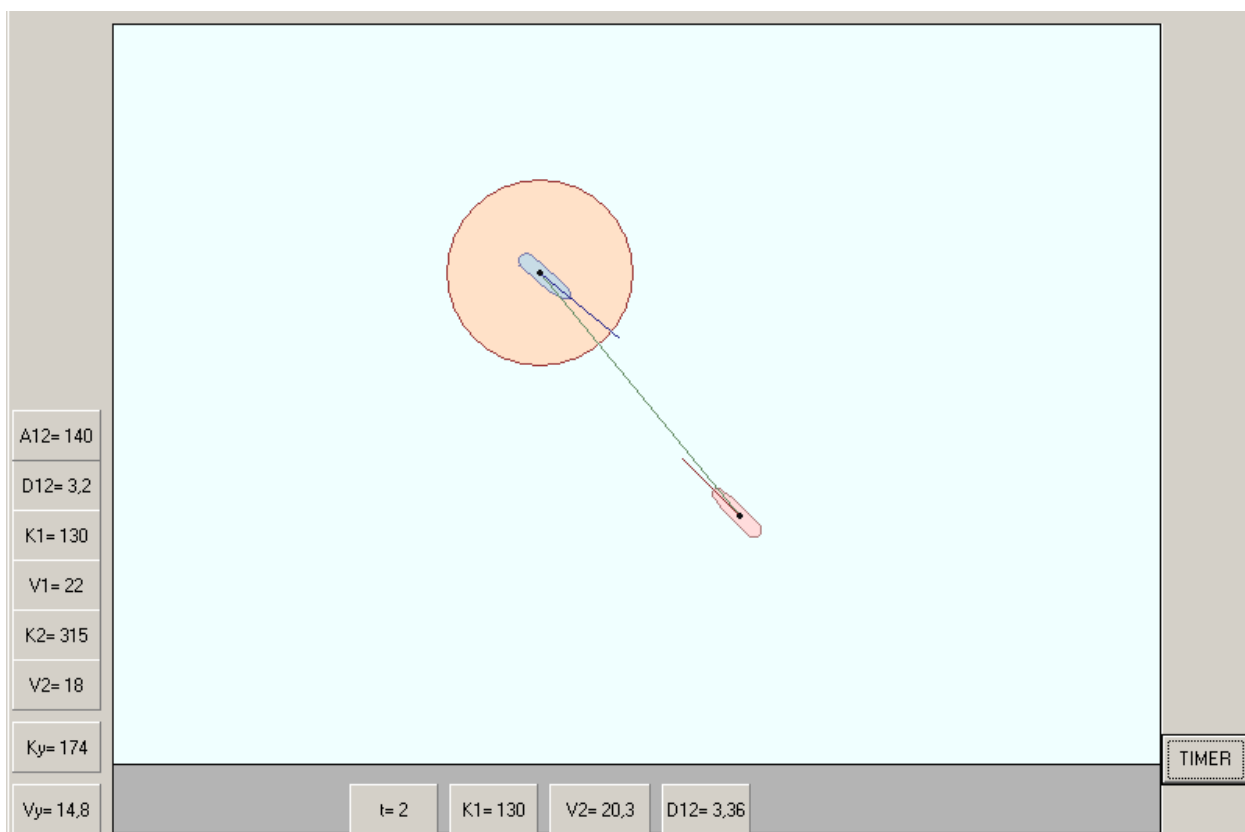


Рис. Д.49. Початок маневру розходження

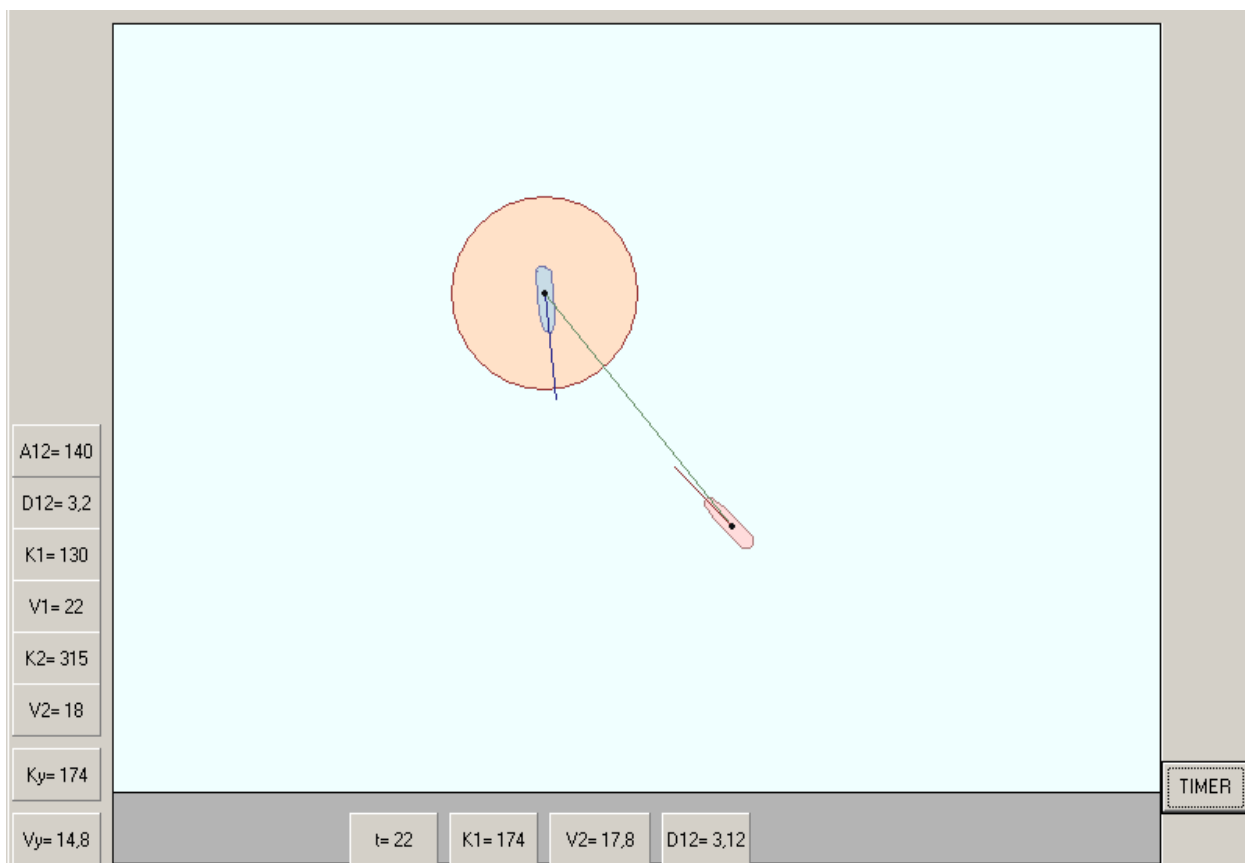


Рис. Д.50. Завершення повороту першого судна

На рис. Д.51 показаний момент часу 57 с, коли друге судно пасивним гальмуванням знижує швидкість до раніше визначеної величини у 14,8 вузлів і переміщається з цією швидкістю до моменту часу найкоротшого зближення. Судна зближуються з вказаними параметрами до моменту часу найкоротшого зближення, яке показане на рис. Д.52. Відзначимо, що найкоротше зближення суден досягається на 346 с процесу розходження, про що свідчить рис. Д.52.

Судна розійшлися на дистанції 0,99 милі, як передбачалося маневром, що підтверджує коректність вибору його параметрів. Для розглянутого маневру розходження зміною курсу першого судна і швидкості другого було вибрано ухилення вправо першого судна, для чого була використана права межа області.

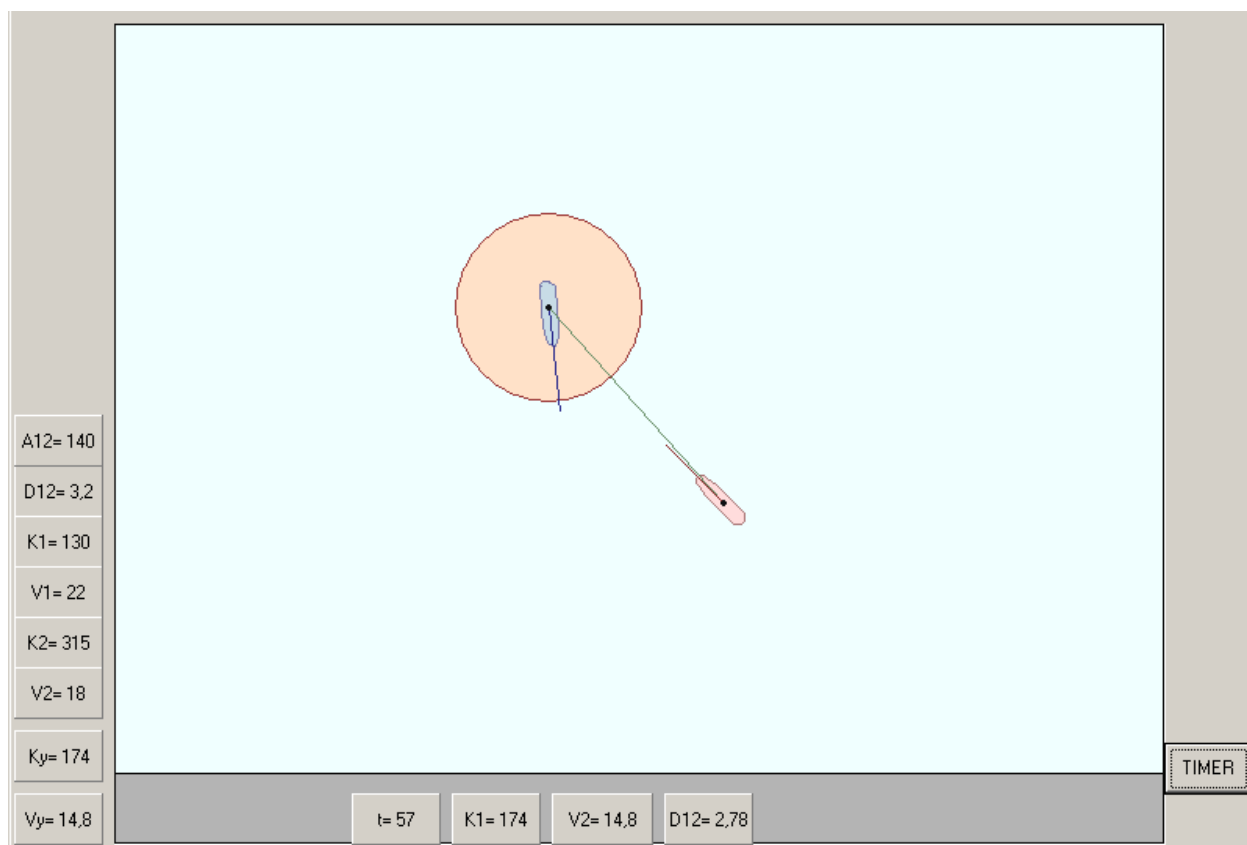


Рис. Д.51. Завершення процесу гальмування другим судном

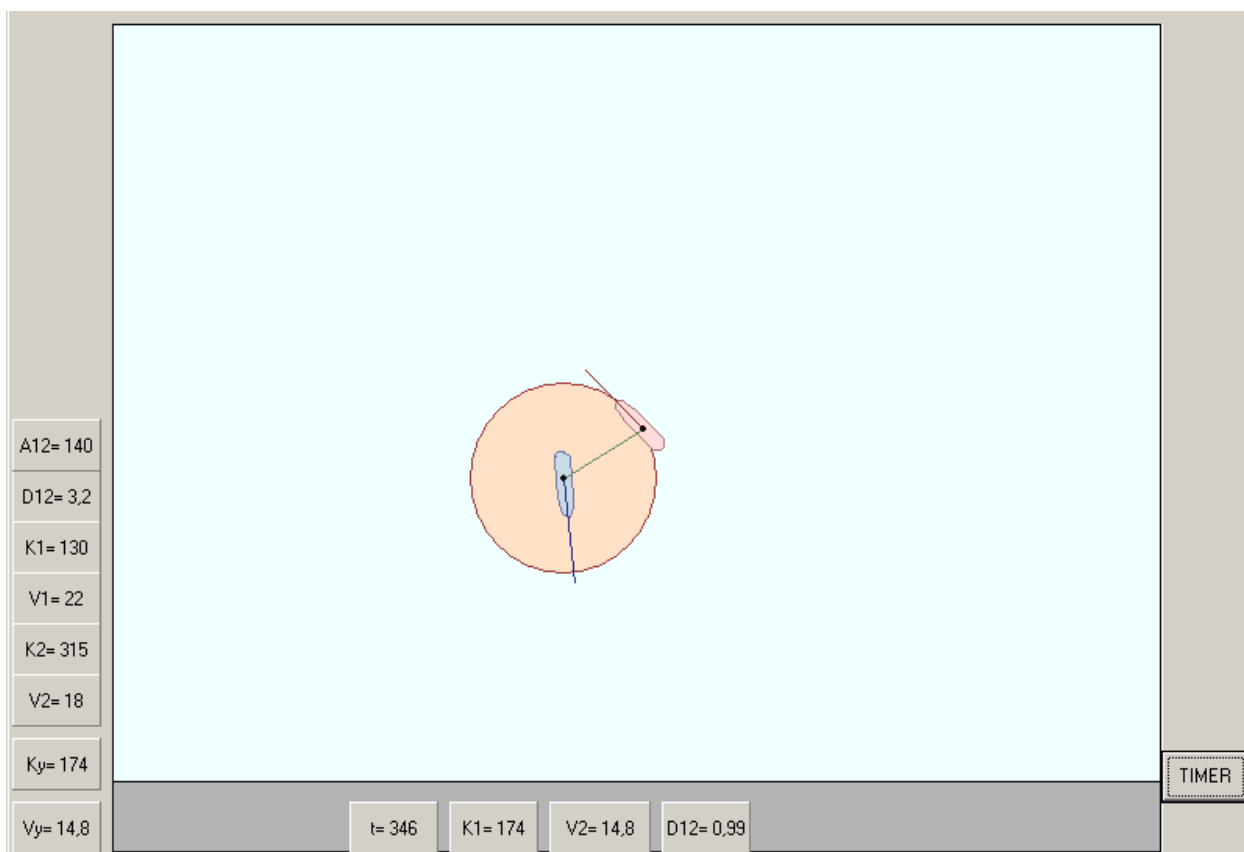


Рис. Д.52. Найкоротше зближення суден

Розглянемо наступну ситуацію небезпечного зближення двох суден, приведено на рис. Д.53, яка характеризується наступними параметрами: курсом $K_c = 122^\circ$ і швидкістю $V_c = 22$ вузла судна, курсом $K_1 = 351^\circ$ і швидкістю $V_1 = 18$ вузлів цілі, дистанція $D_1 = 3,0$ милі і пеленг $\alpha_1 = 150^\circ$. Для даної ситуації небезпечного зближення двох суден отримана область неприпустимих значень курсів першого судна і швидкостей другого судна, яке виконує активне гальмування, як показано на рис. Д.54. З її допомогою вибраний безпечний маневр розходження з параметрами: курсом ухилення першого судна 21° і швидкістю другого судна для розходження, яка дорівнює 18,6 вузли. При цьому прогнозована дистанція найкоротшого зближення складає 0,99 милі.

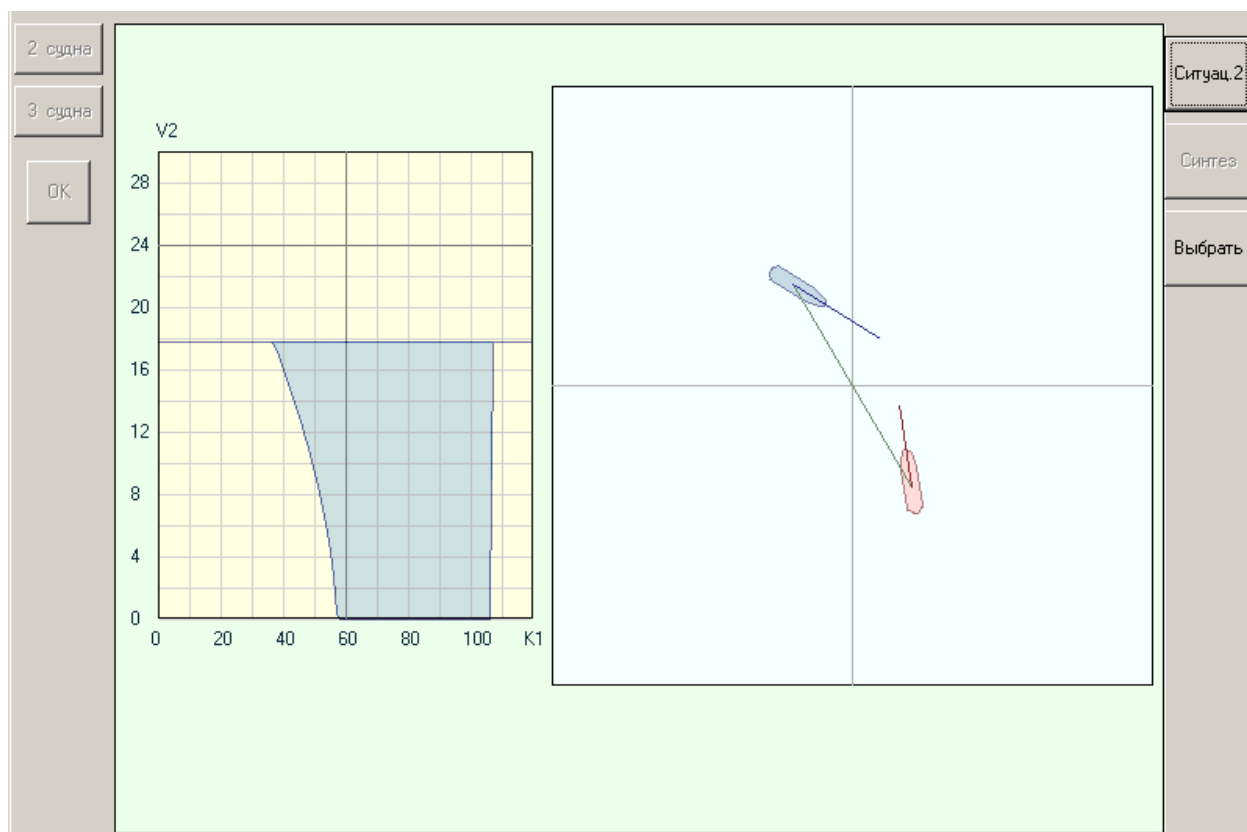


Рис. Д.53. Наступна ситуація небезпечного зближення двох суден

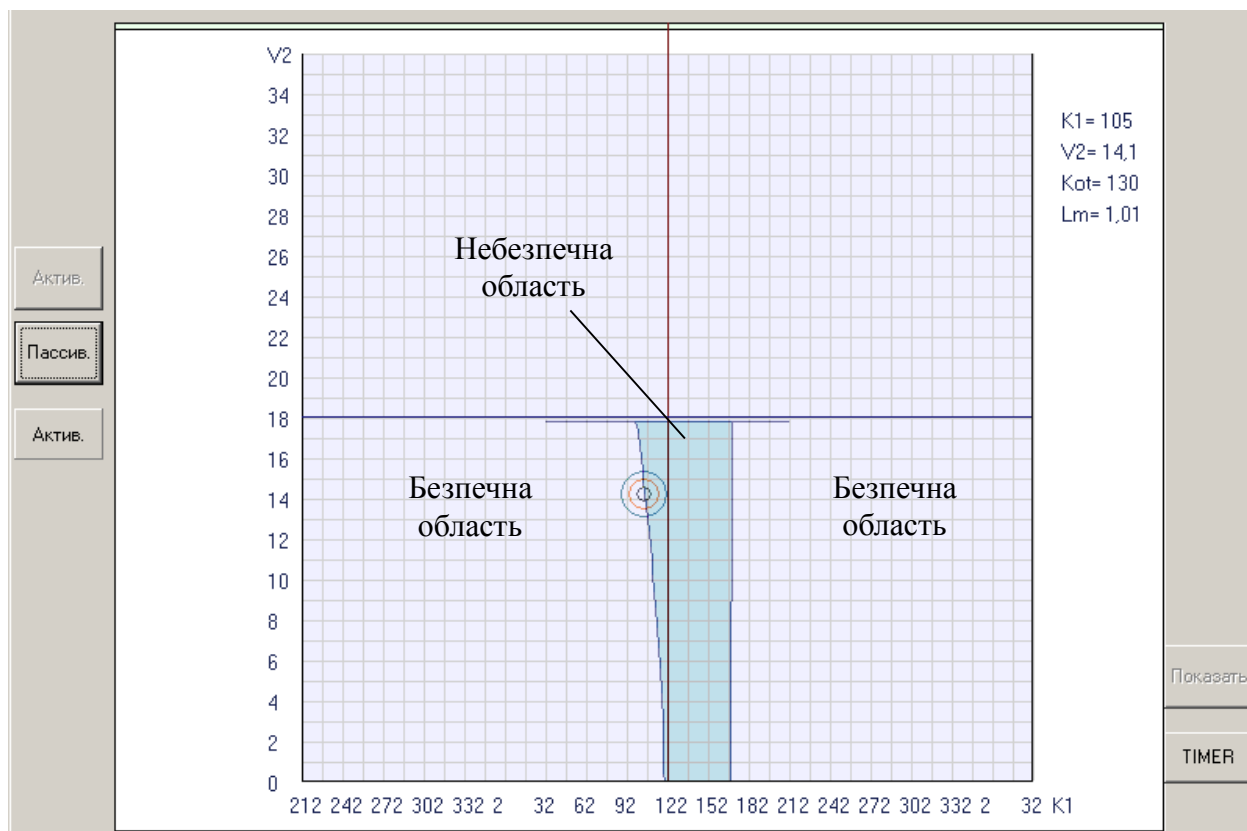


Рис. Д.54. Вибір безпечного маневру розходження ухиленням вліво

При імітаційному моделюванні на початку процесу розходження (рис. Д.55) перше судно починає поворот на курс ухилення 105° , в той самий час друге судно починає активним гальмуванням знижувати свою швидкість. Перше судно завершує процес розходження поворотом на 12 с, як показано на рис. Д.56, і до кінця процесу розходження слідує сталим курсом ухилення 105° .

У момент часу 56 с, як показано на рис. Д.57, друге судно закінчує активне гальмування до швидкості 14,1 вузлів. Далі друге судно рухається з цією швидкістю до завершення маневру розходження, тобто до моменту часу найкоротшого зближення. Обидва судна продовжують зближуватися з вказаними параметрами руху до моменту часу найкоротшого зближення, як показано на рис. Д.58. У момент часу найкоротшого зближення суден дистанція між ними складає 1,02 милі, тобто не менш гранично - допустимої дистанції зближення.

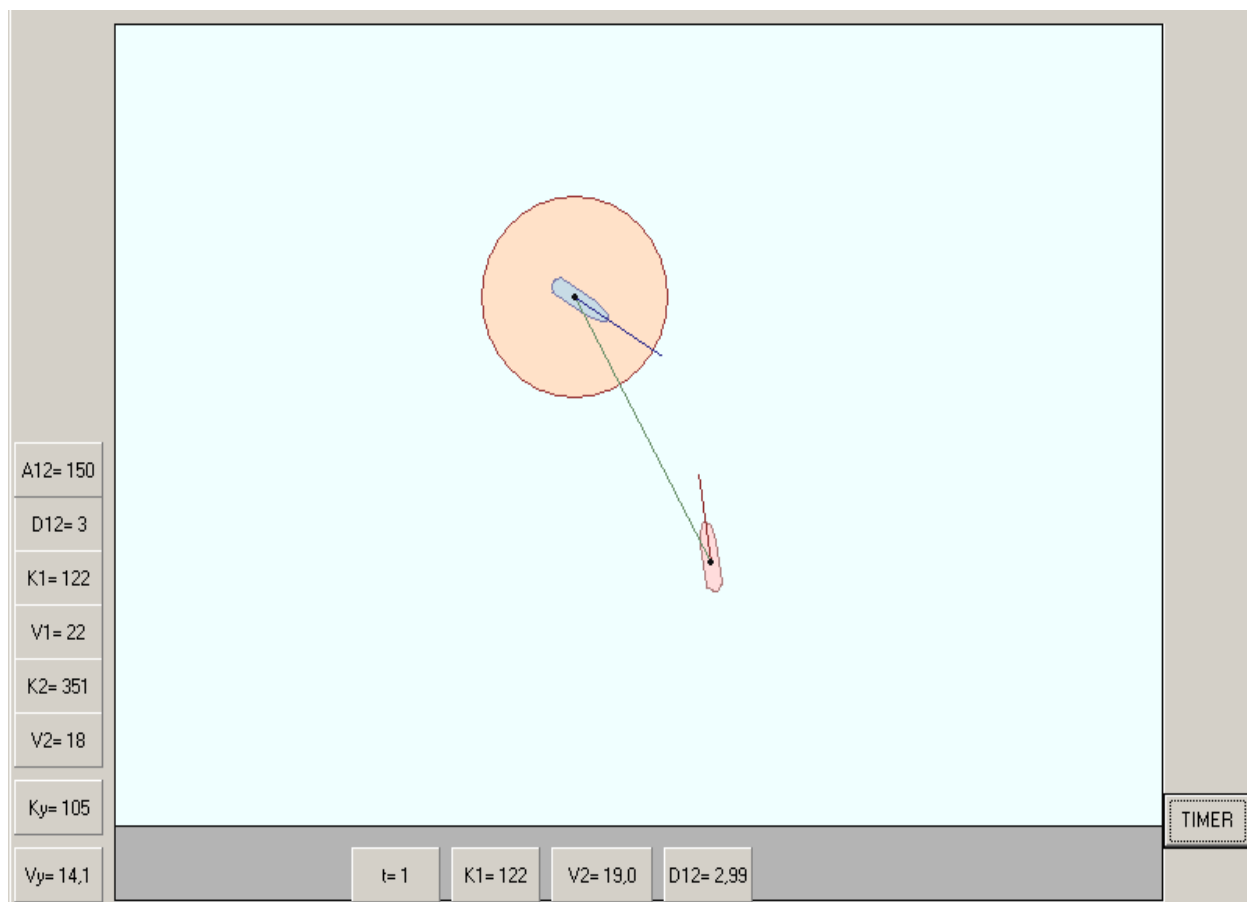


Рис. Д.55. Початок маневру розходження

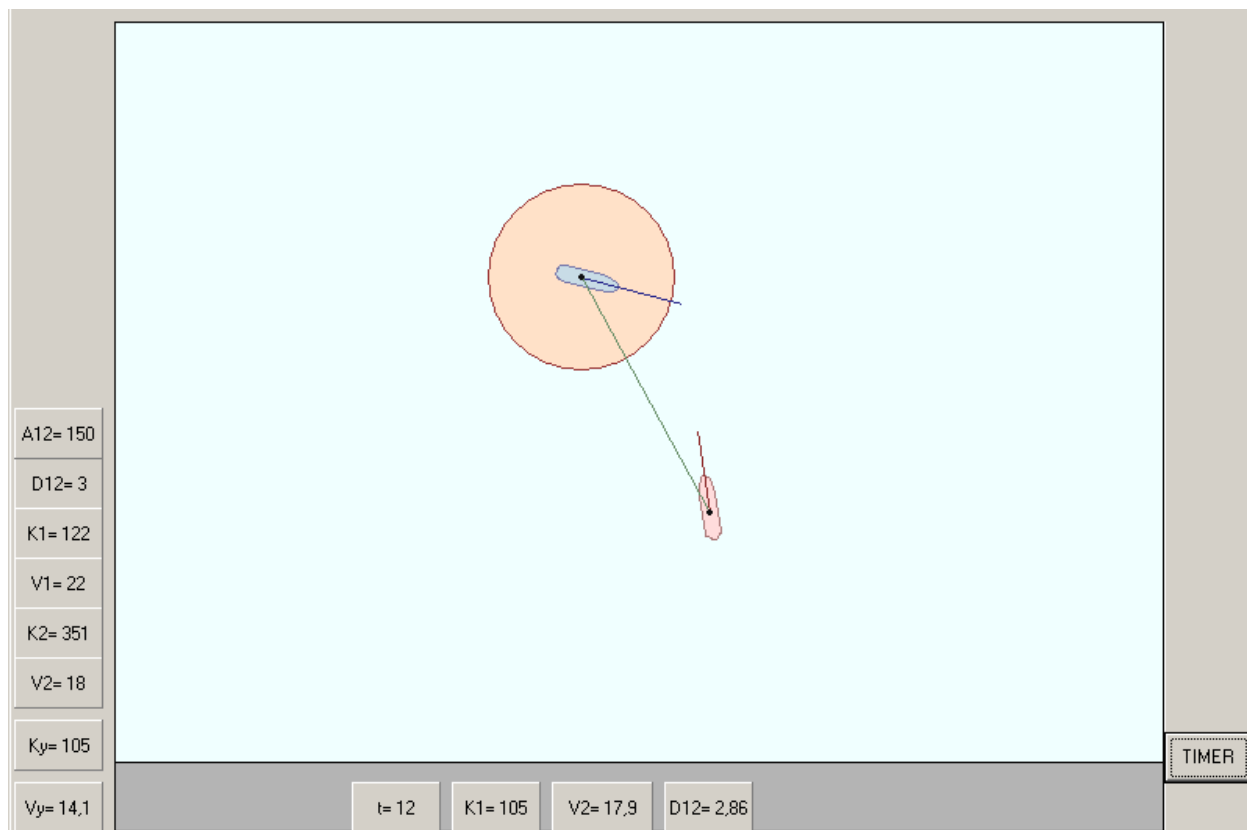


Рис. Д.56. Закінчення повороту першим судном

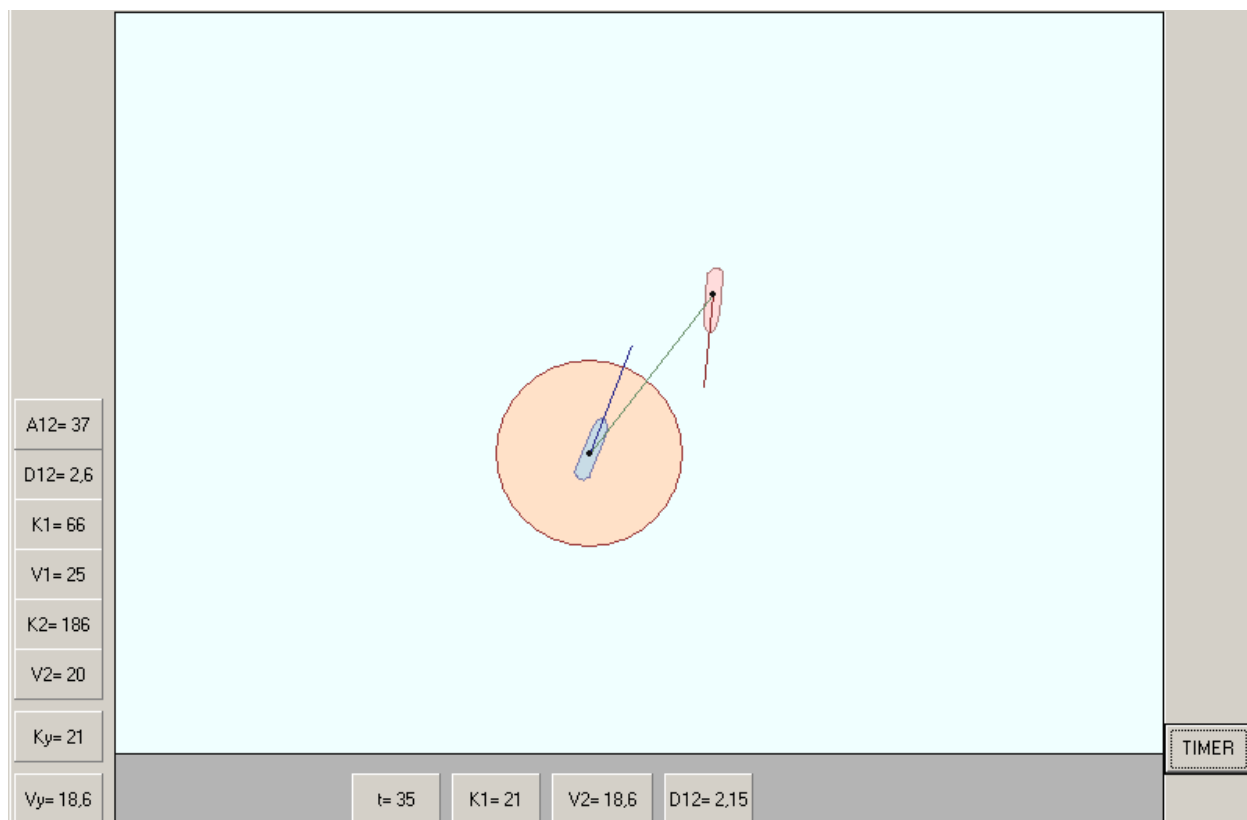


Рис. Д.57. Завершення активного гальмування другим судном

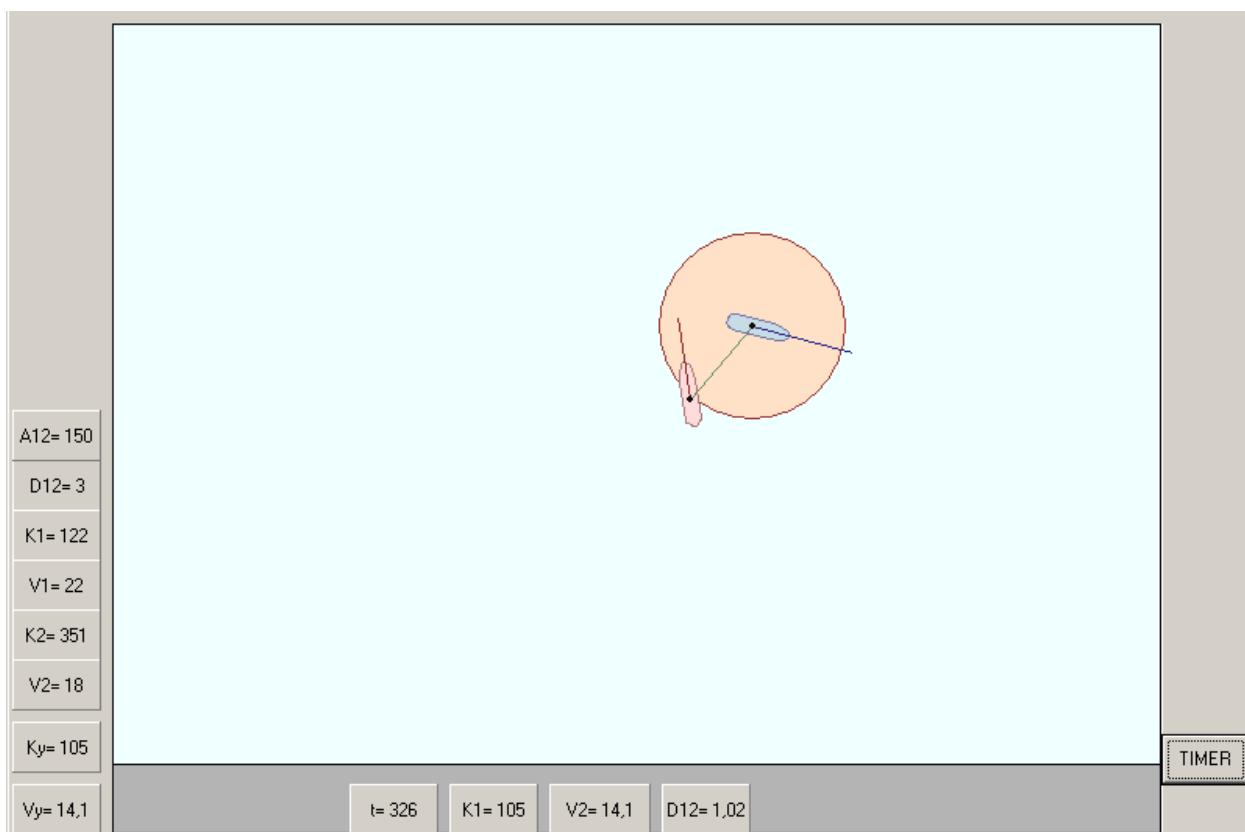


Рис. Д.58. Найкоротше зближення суден

Імітаційне моделювання процесу розходження надалі проводилося в ситуаціях наявності третього судна, що заважає. В якості прикладу була вибрана заключна ситуація зближення трьох суден, графічне відображення якої показано на рис. Д.59. Область неприпустимих значень курсів першого судна і швидкостей другого судна, яке здійснює активне гальмування, приведена на рис. Д.60. За допомогою цієї області вибрано маневр розходження безпечний для всіх трьох суден, що також видно з рис. Д.60. Початок процесу розходження відображено на рис. Д.61. Причому перше судно починає поворот для ухилення на курс 153° , а друге судно знижує швидкість активним гальмуванням. В момент часу 16 с перше судно завершує поворот і надалі не змінює свій курс до завершення маневру розходження, що видно на рис. Д.62. До моменту часу 99 с друге судно продовжує активне гальмування, як показано на рис. Д.63, після чого утримує сталою швидкість 11,3 вузли.

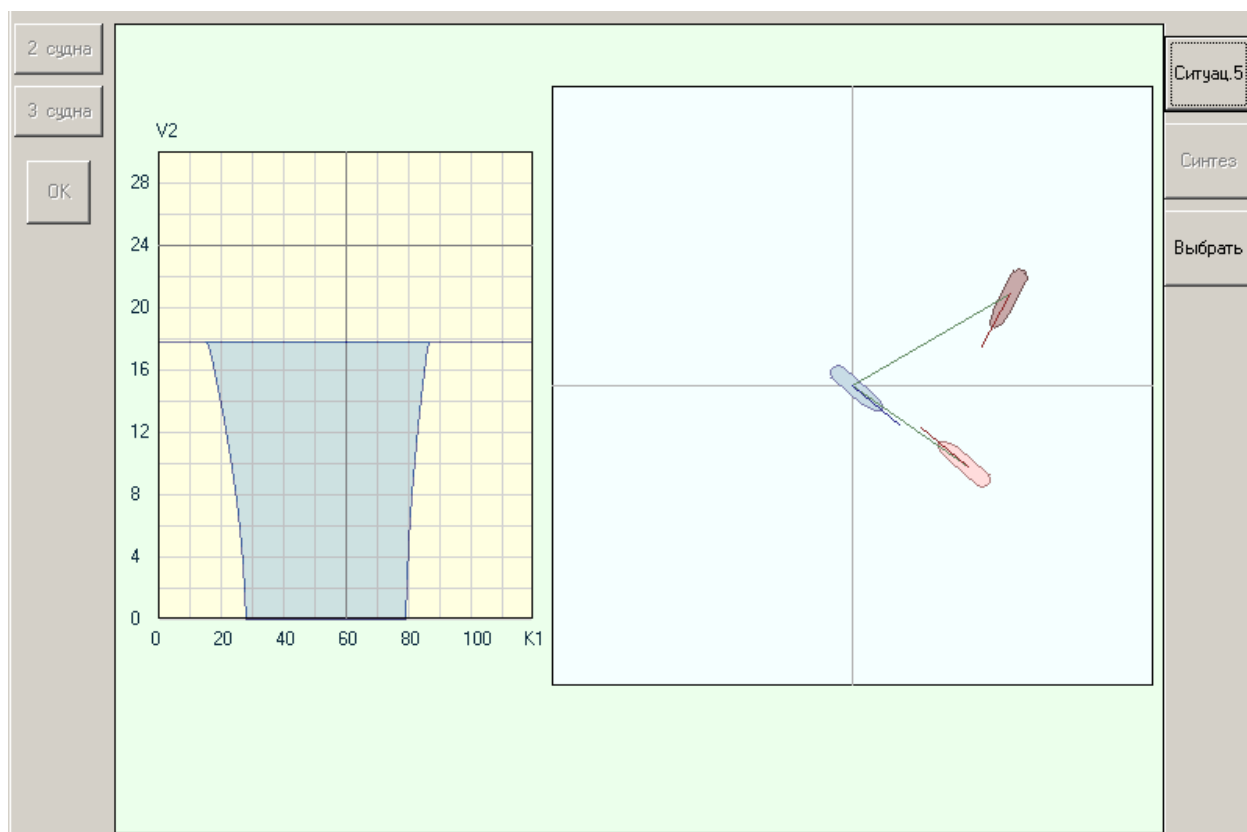


Рис. Д.59. Заключна ситуація зближення трьох суден

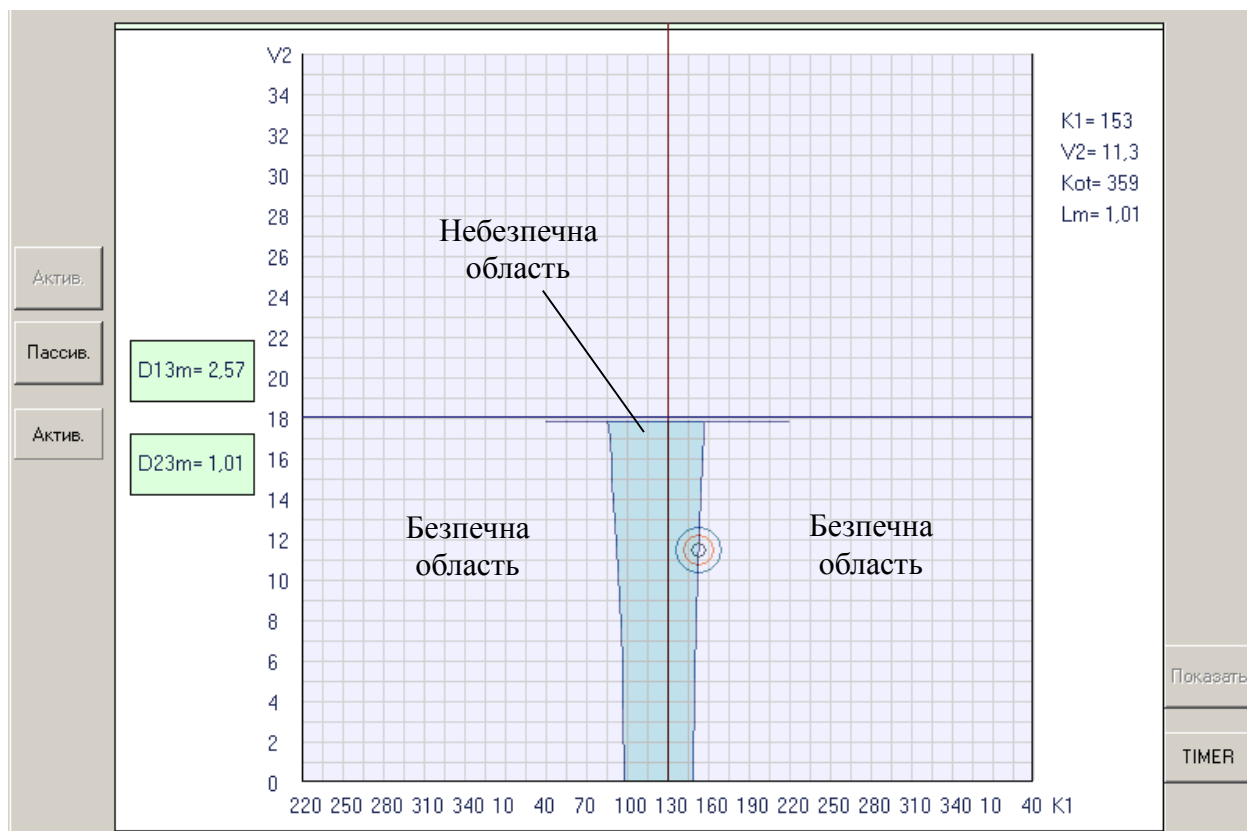


Рис. Д.60. Вибір безпечного маневру розходження трьох суден

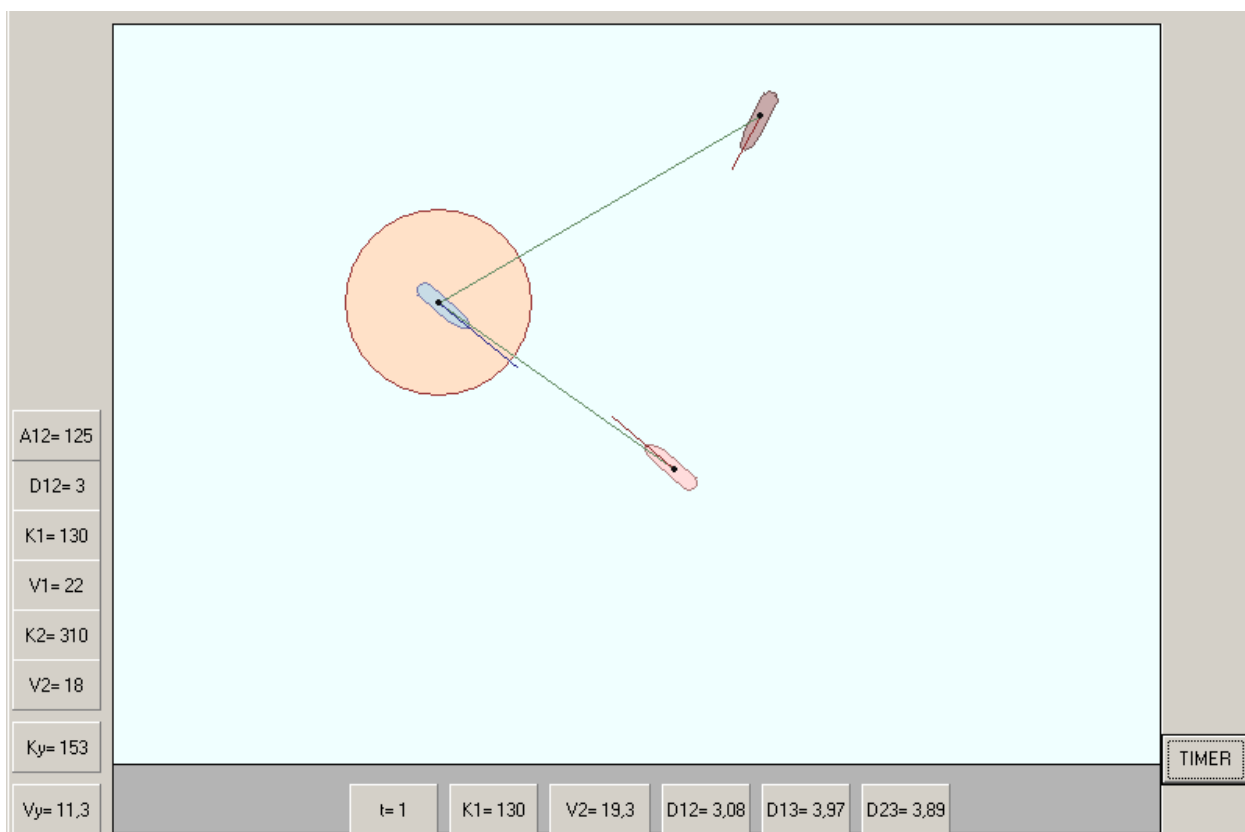


Рис. Д.61. Початок процесу розходження

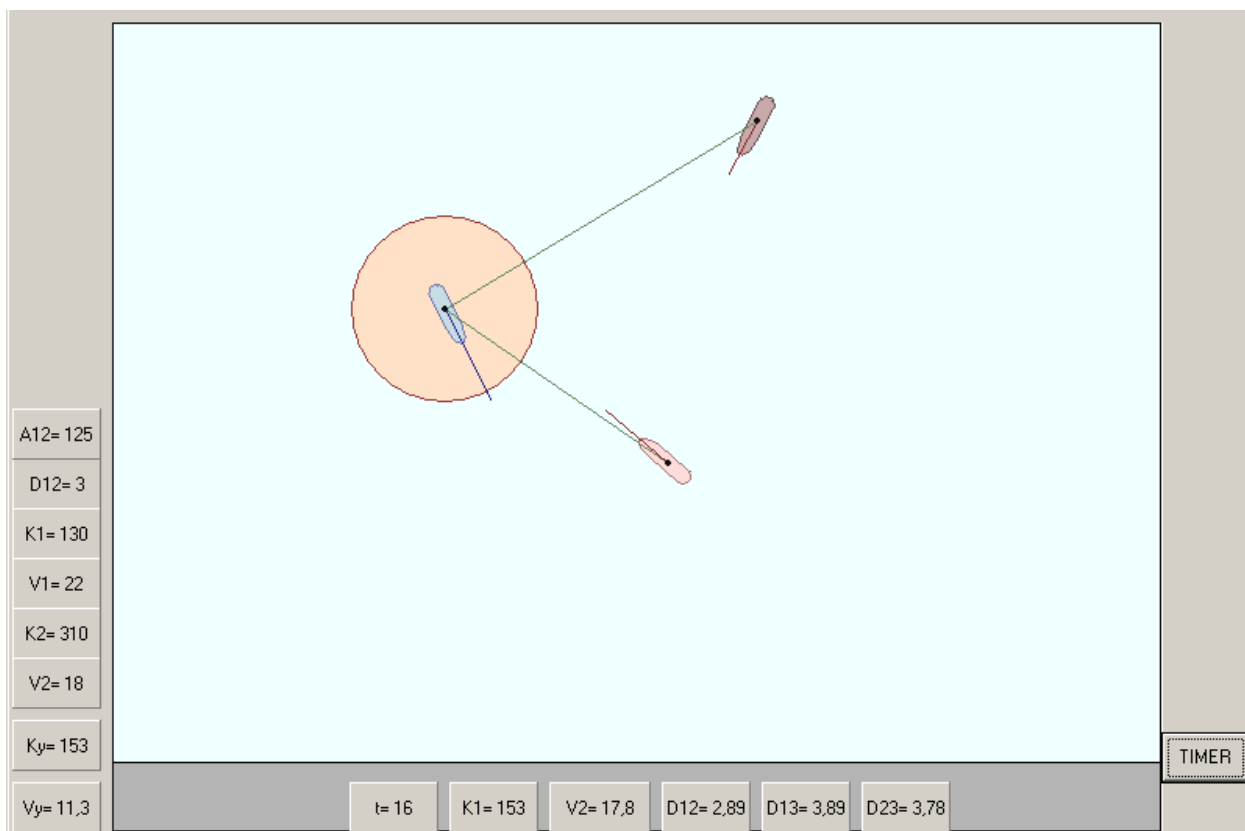


Рис. Д.62. Закінчення повороту першого судна

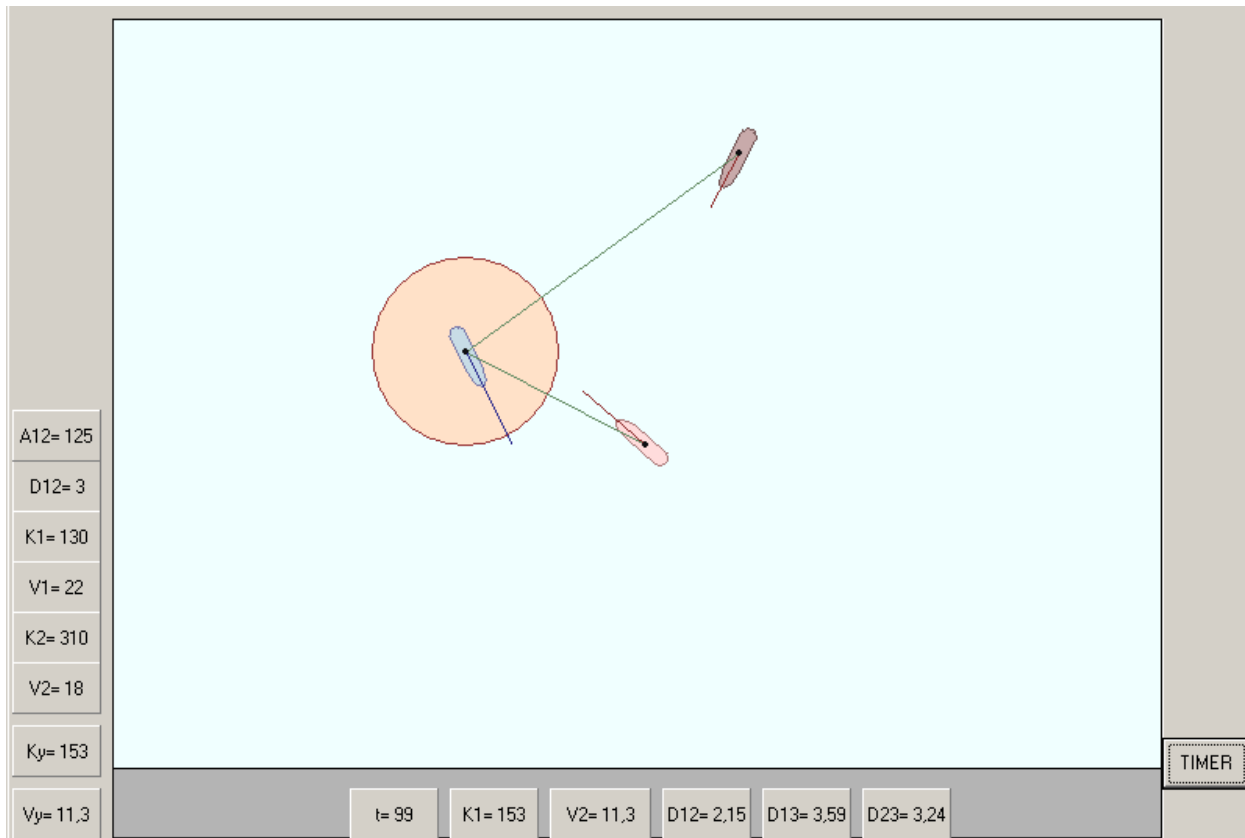


Рис. Д.63. Закінчення активного гальмування другим судном

Найкоротше зближення першого і другого суден відбувається на 311 с процесу розходження, як показано на рис. Д.64, і дистанція між суднами рівна 1,00 милі, що вказує на безпечне розходження першого і другого суден. На 559 с процесу розходження відбувається найкоротше зближення другого і третього суден на дистанцію 1,03 милі, що передбачалося вибраним маневром, а дана ситуація найкоротшого зближення зображена на рис. Д.65. Розходження першого і третього суден також є безпечним, так як дистанція найкоротшого зближення більша гранично - допустимої дистанції зближення, що показано на 572 с процесу розходження, причому найкоротше зближення першого і третього суден здійснюється на дистанцію 2,70 милі (рис. Д.66).

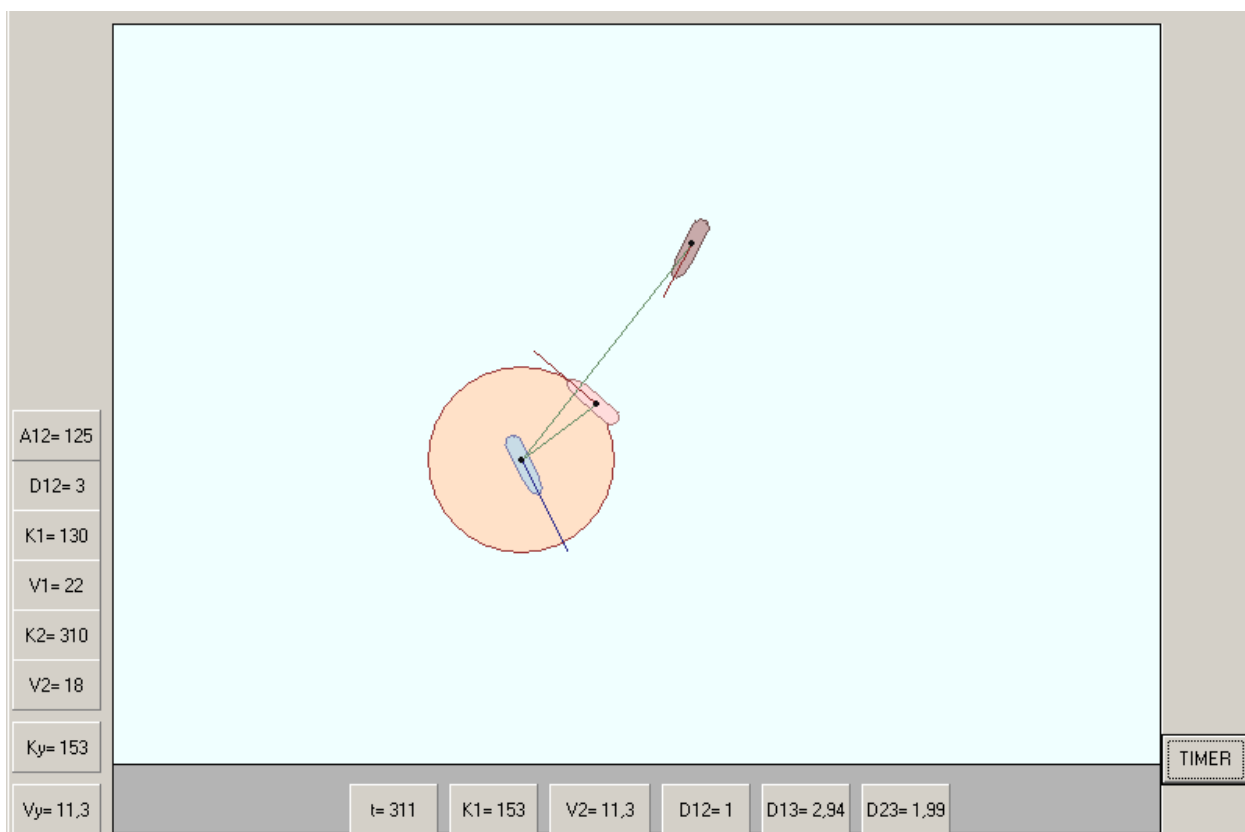


Рис. Д.64. Найкоротше зближення першого і другого суден

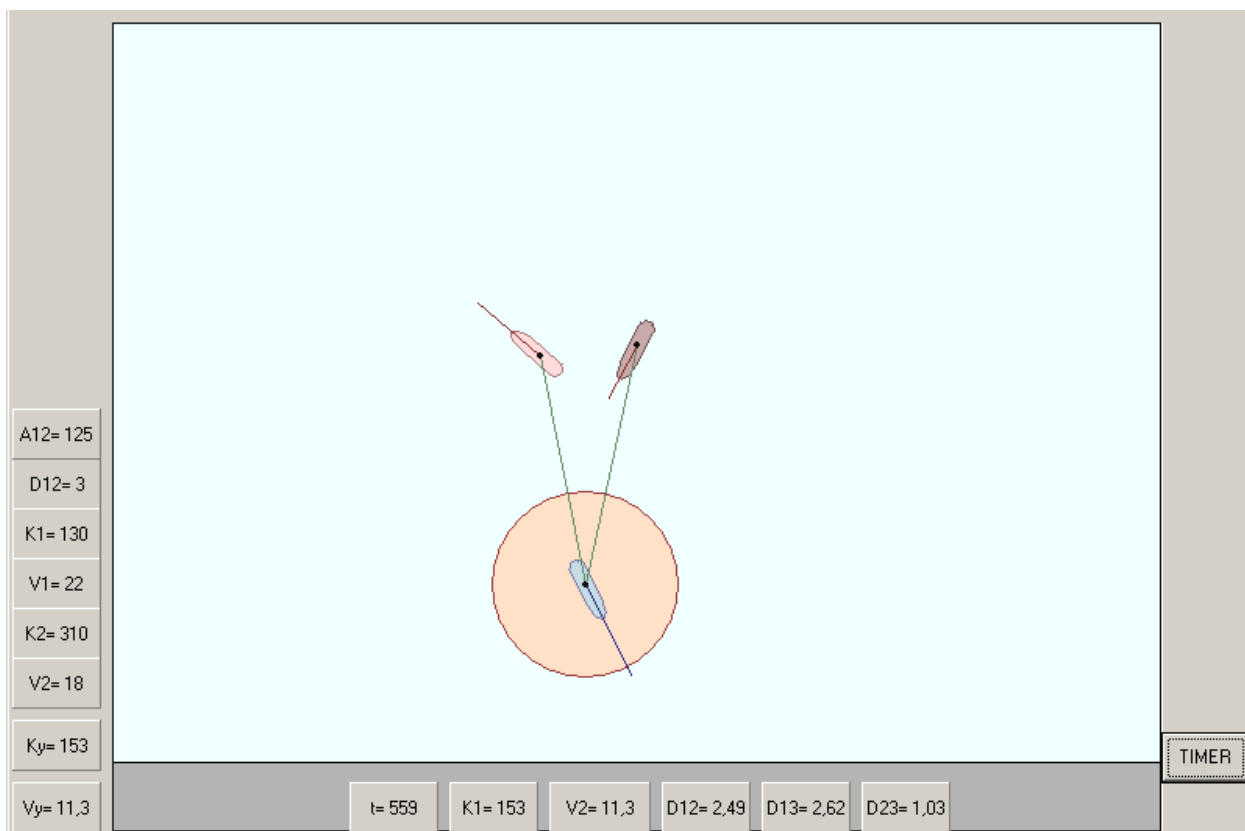


Рис. Д.65. Найкоротше зближення третього і другого суден

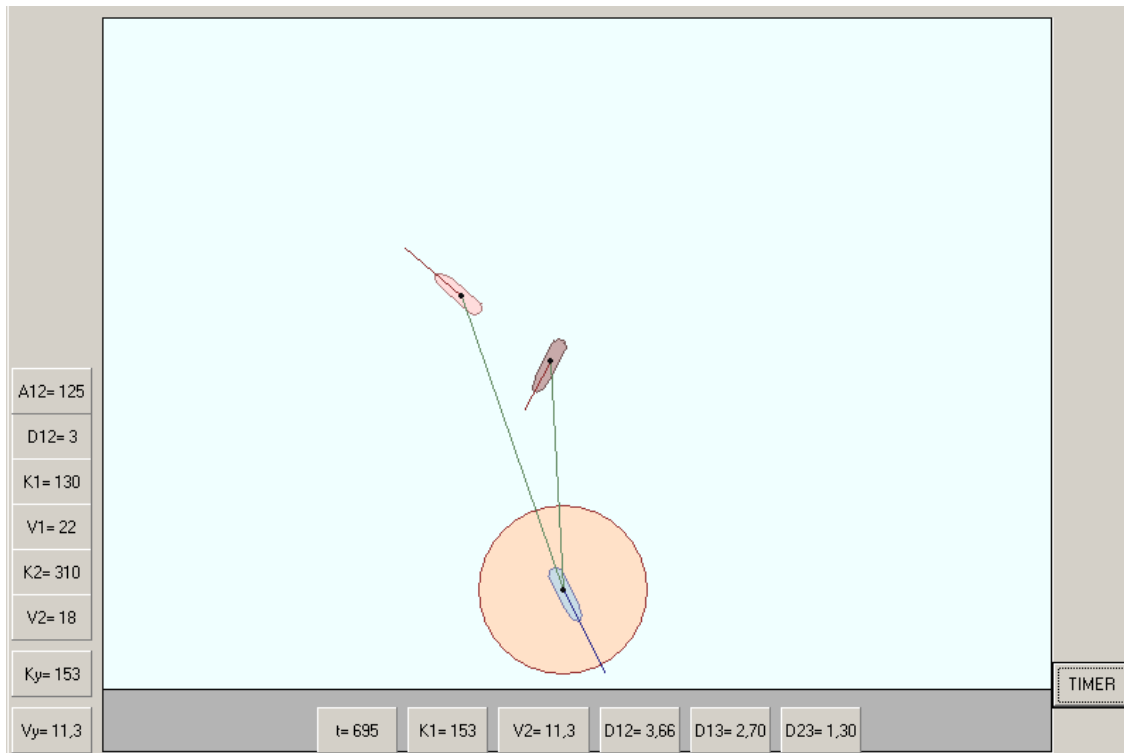


Рис. Д.66. Найкоротше зближення першого і третього суден

З вище описаного бачимо, що всі параметри маневру розходження з урахуванням судна, яке заважає, визначені коректно.

Д.4. Імітаційне моделювання процесу розходження з використанням області неприпустимих значень курсів суден нестандартної аналітичної системи попередження зіткнень суден з доменом еліптичної форми

Розглянемо перевірку коректності вибору маневру розходження пари суден зміною їх курсів в разі використання нестандартної аналітичної системи попередження зіткнень суден в разі реалізації доменів еліптичної і прямокутної форми. Спочатку проаналізуємо нестандартну аналітичну систему попередження зіткнень суден з доменом еліптичної форми. Для цього використаємо відповідний модуль імітаційної програми. Вибираємо початкову ситуацію небезпечного зближення, яка відображена на рис. Д.67, та вибираємо домен еліптичної форми (рис. Д.68).

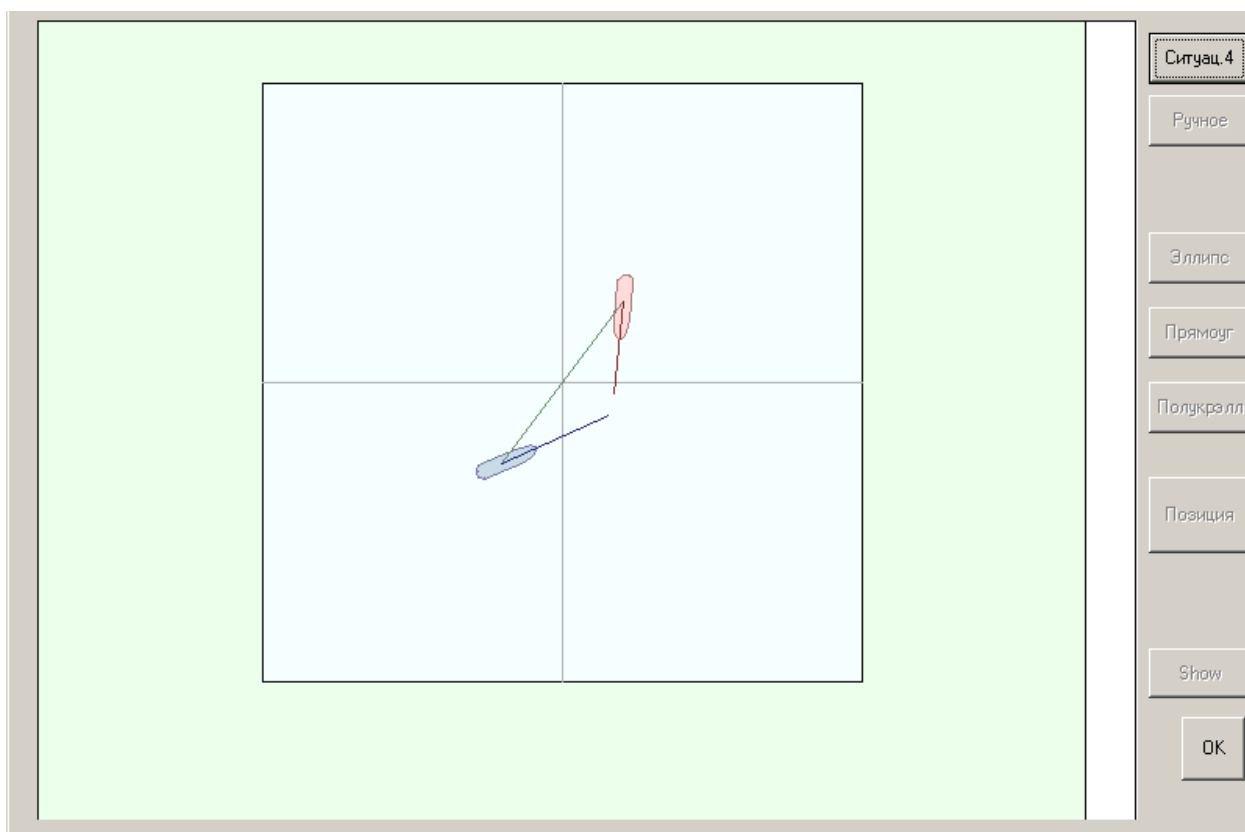


Рис. Д.67. Початкова ситуація небезпечного зближення

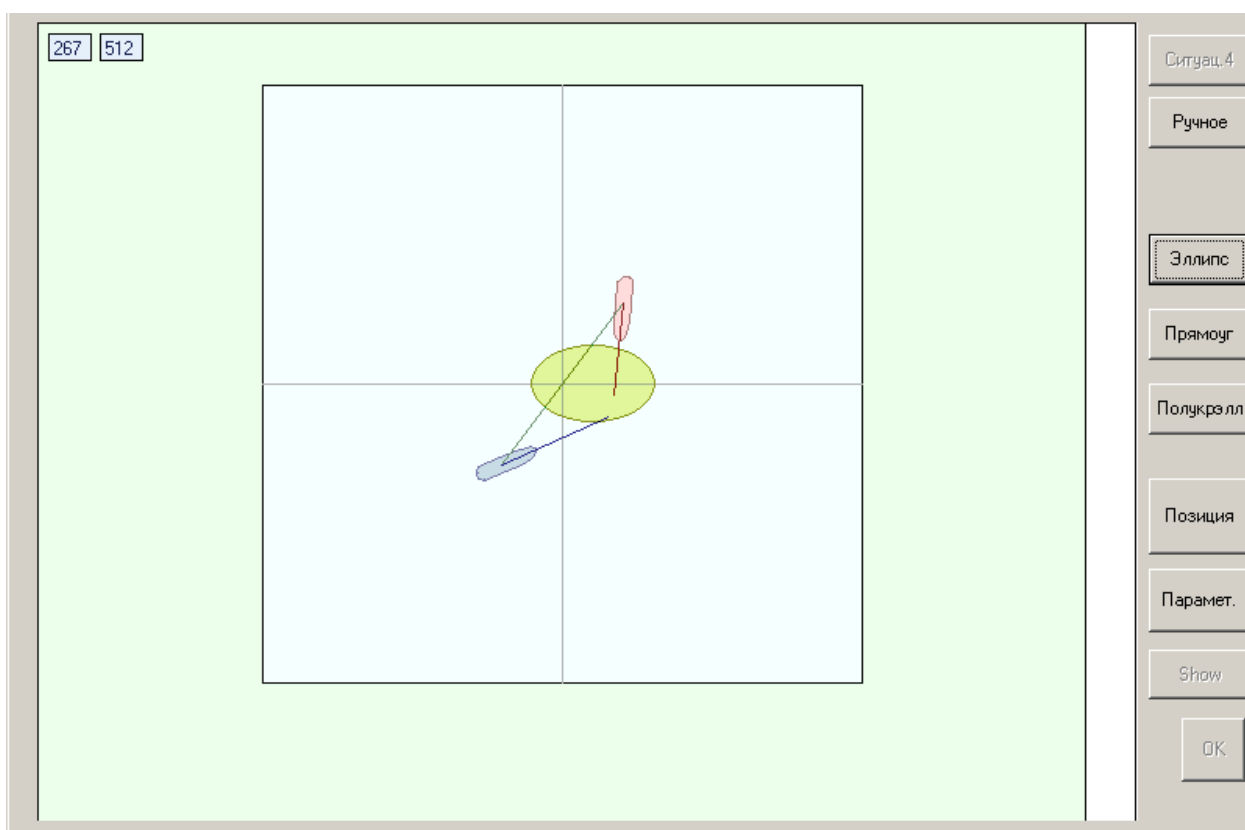


Рис. Д.68. Вибір домену еліптичної форми

На рис. Д.69 показана область неприпустимих значень курсів суден елементарної групи для домену еліптичної форми і вибрано маневр розходження на межі області неприпустимих значень курсів з параметрами $K_{1y} = 43^\circ$ та $K_{2y} = 225^\circ$, при якому досягається дистанція найкоротшого зближення $L_m = 0,31$ милі.

Переміщення суден по лінії відносного курсу показано на рис. Д.70, з якого видно, що судно проходить по межі домену. Було проведено імітаційне моделювання вибраного маневру розходження, результати якого представлені на рис. Д.71...Д.73. Так, на рис. Д.71 показано початок процесу розходження суден на 9 с часу. Судна зближаються, і на 185 с часу перше судно знаходиться на межі домену еліптичної форми, як показано на рис. Д.72. На 204 с часу процесу розходження суден досягається дистанція найкоротшого зближення, як відображено на рис. Д.73.

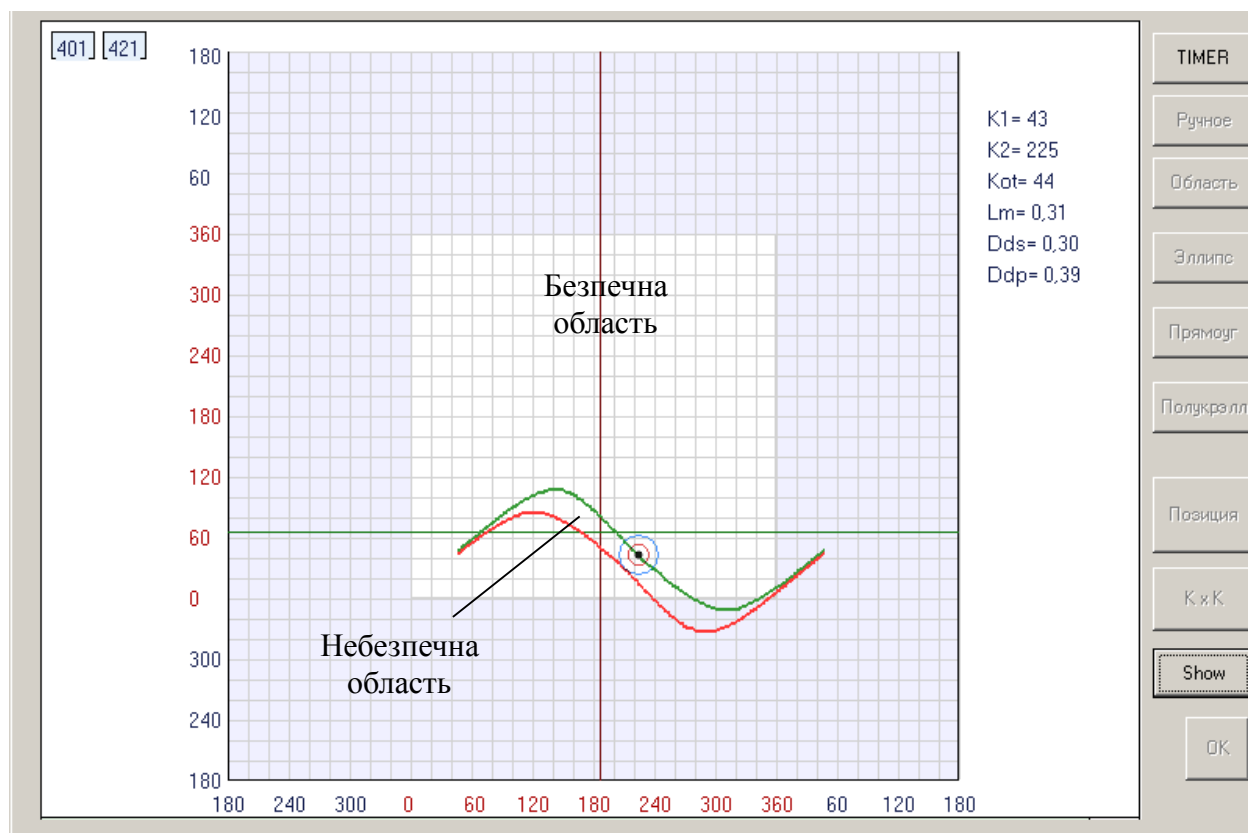


Рис. Д.69. Вибір маневру розходження

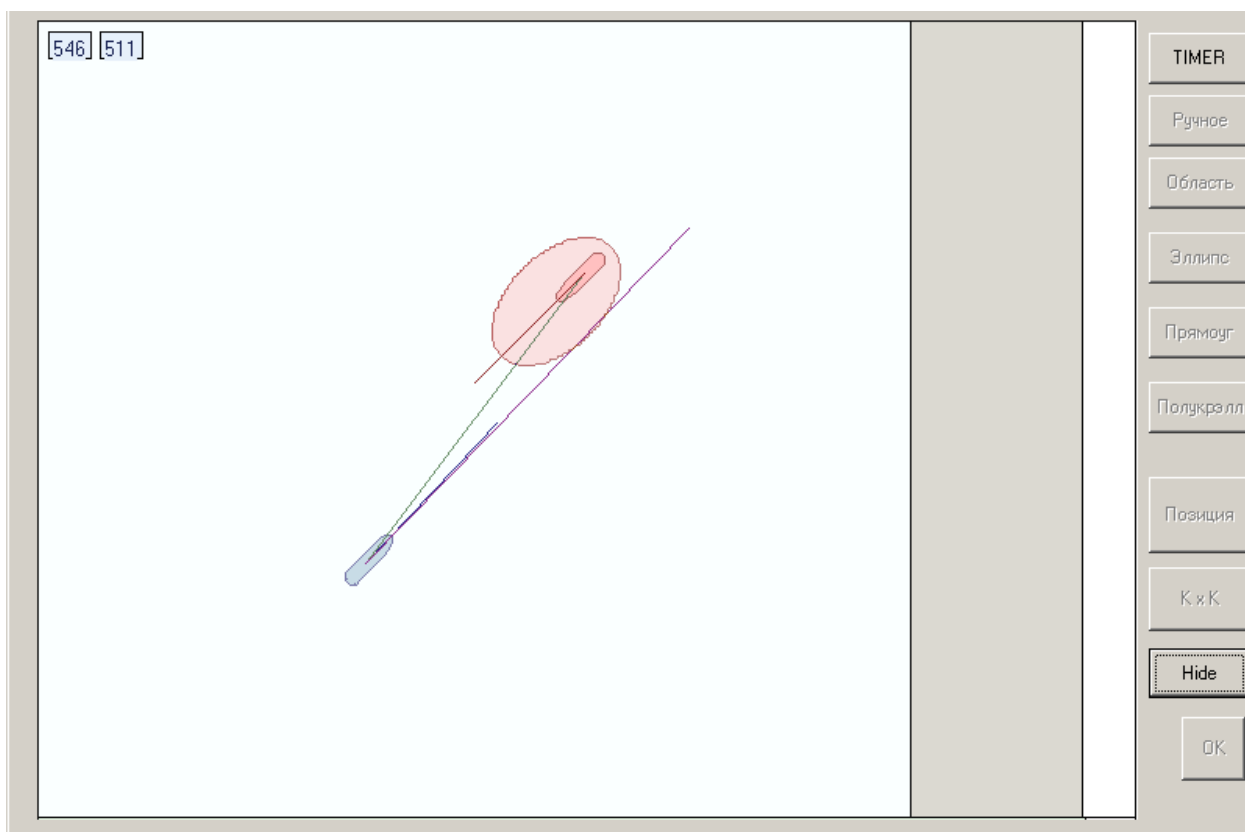


Рис. Д.70. Положення лінії відносного курсу

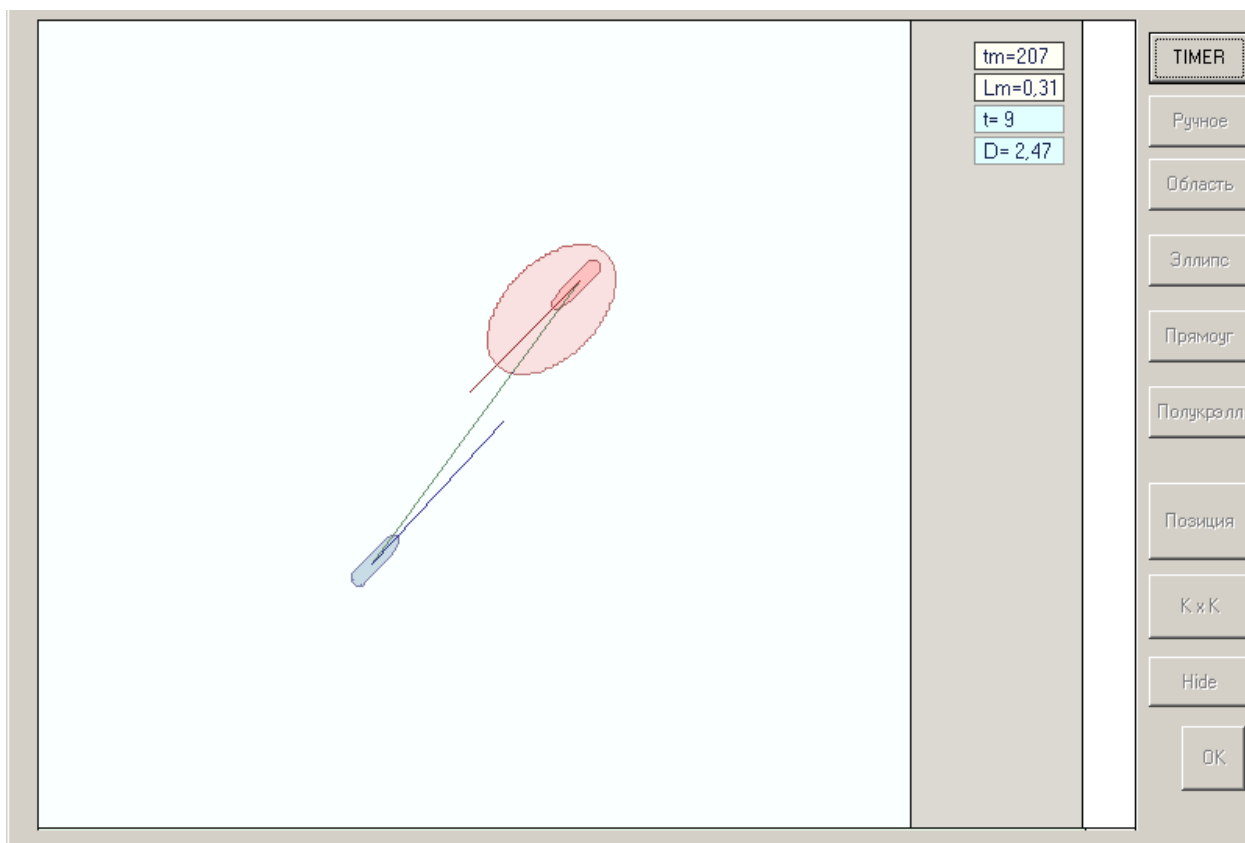


Рис. Д.71. Початок процесу розходження суден

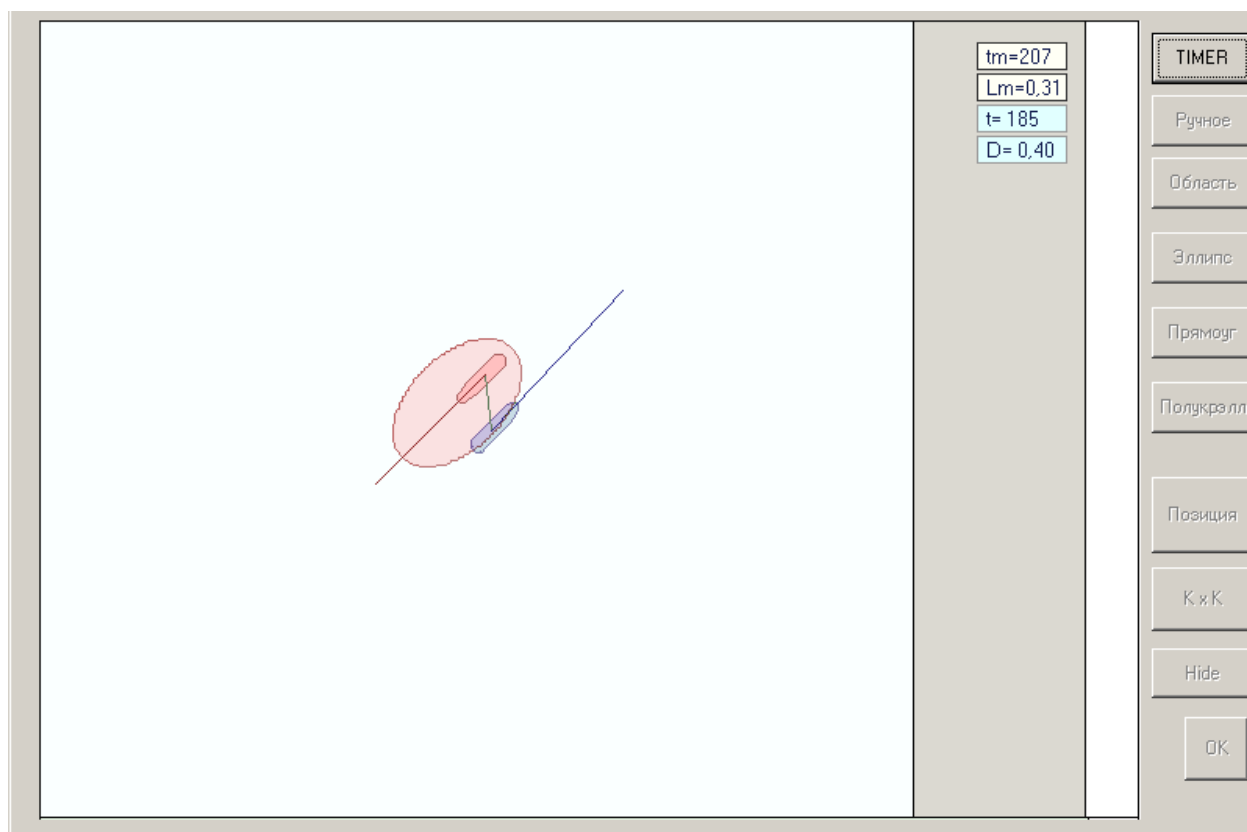


Рис. Д.72. Процесс розходження на 185 с

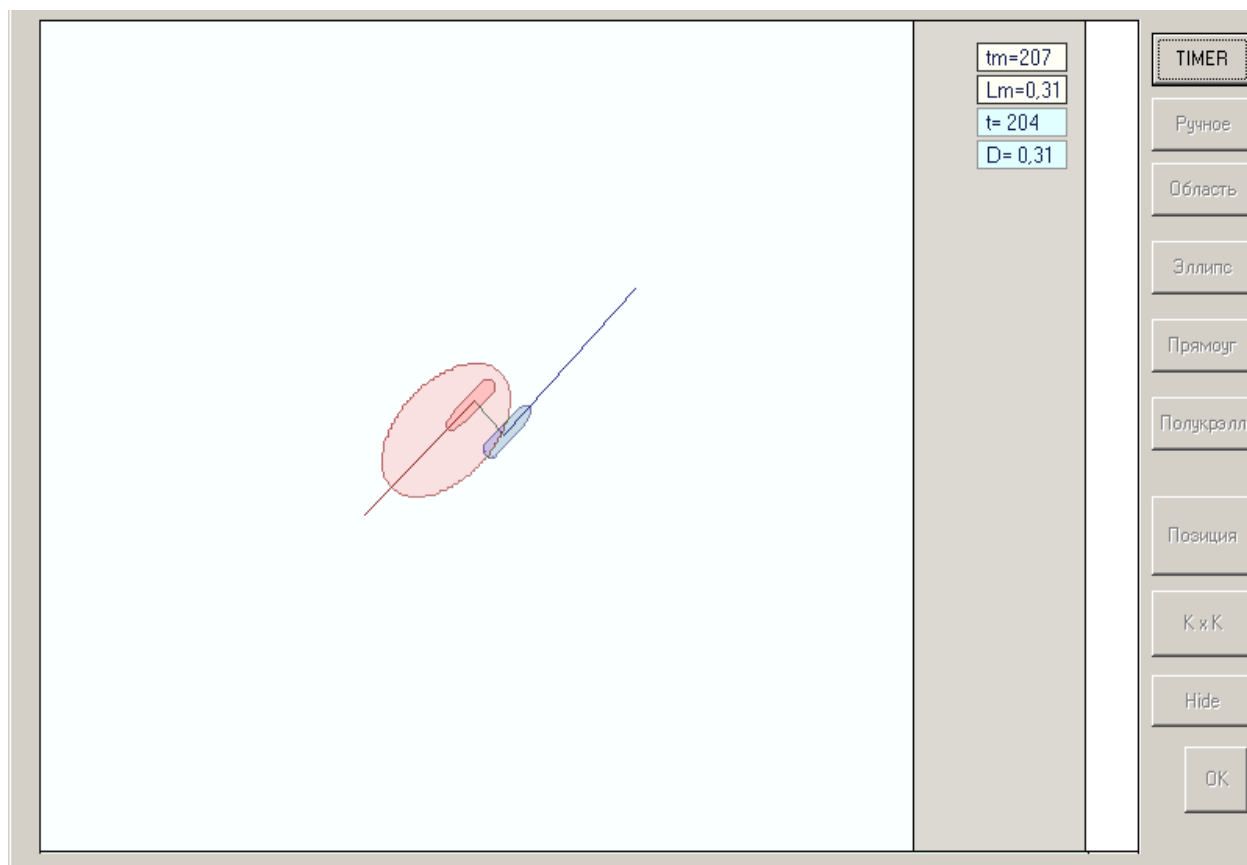


Рис. Д.73. Момент найкоротшого зближення суден

Д.5. Імітаційне моделювання процесу розходження з використанням області неприпустимих значень курсів суден нестандартної аналітичної системи попередження зіткнень суден з доменом прямокутної форми

Розглянемо перевірку коректності вибору маневру розходження в разі використання нестандартної аналітичної системи попередження зіткнень суден з доменом прямокутної форми, для чого скористаємося потрібним модулем імітаційної програми. Для прикладу вибираємо наступну ситуацію небезпечного зближення, яка відображена на рис. Д.74, та проведемо вибір домену форми, що показано на рис. Д.75.

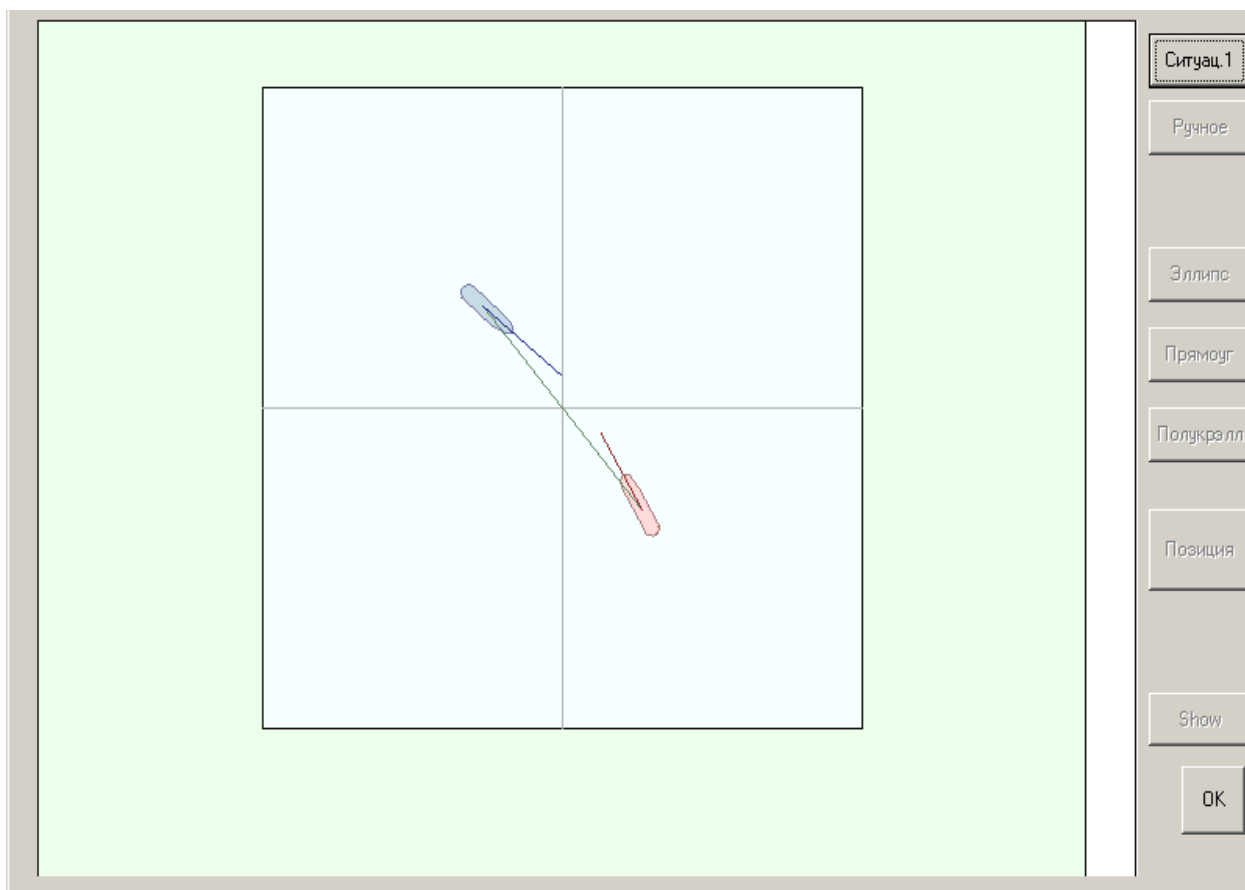


Рис. Д.74. Наступна ситуація небезпечного зближення

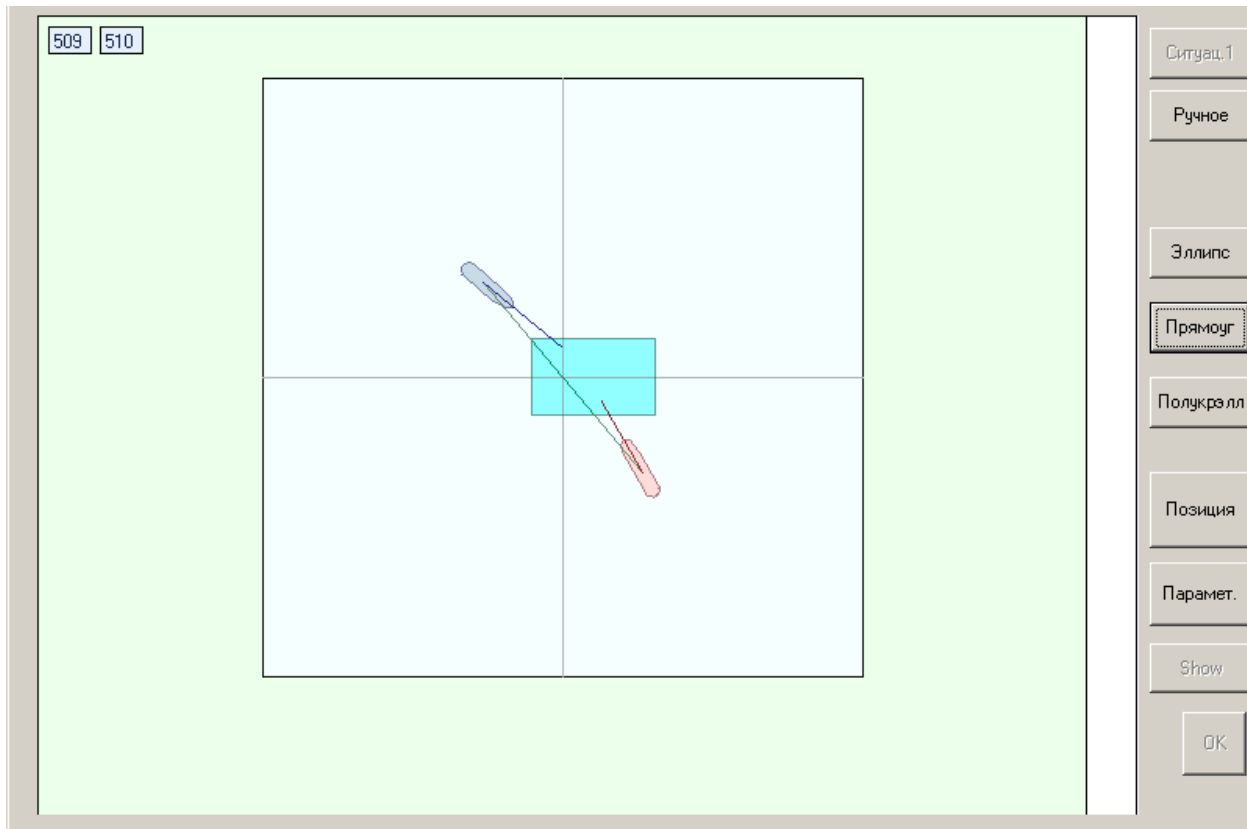


Рис. Д.75. Вибір домену прямокутної форми

Область неприпустимих значень курсів суден елементарної групи для домену прямокутної форми показана на рис. Д.76 і проведено вибір маневру розходження ухиленням вліво на нижній межі області неприпустимих значень курсів з параметрами $K_{1y} = 97^\circ$ та $K_{2y} = 343^\circ$, який забезпечує дистанцію найкоротшого зближення $L_m = 0,75$ милі.

На рис. Д.77 показане переміщення суден по оптимальній лінії відносного курсу, з якого видно, що судно проходить по дотичній до межі прямокутного домену. На рис. Д.78...Д.80 представлені результати імітаційного моделювання одержаного маневру розходження, які підтверджують коректність запропонованого методу визначення курсів ухилення суден для безпечного розходження. На рис. Д.78 показано процес розходження суден на 1 с часу. На 285 с часу перше судно знаходиться на межі прямокутного домену, як показано на рис. Д.79.

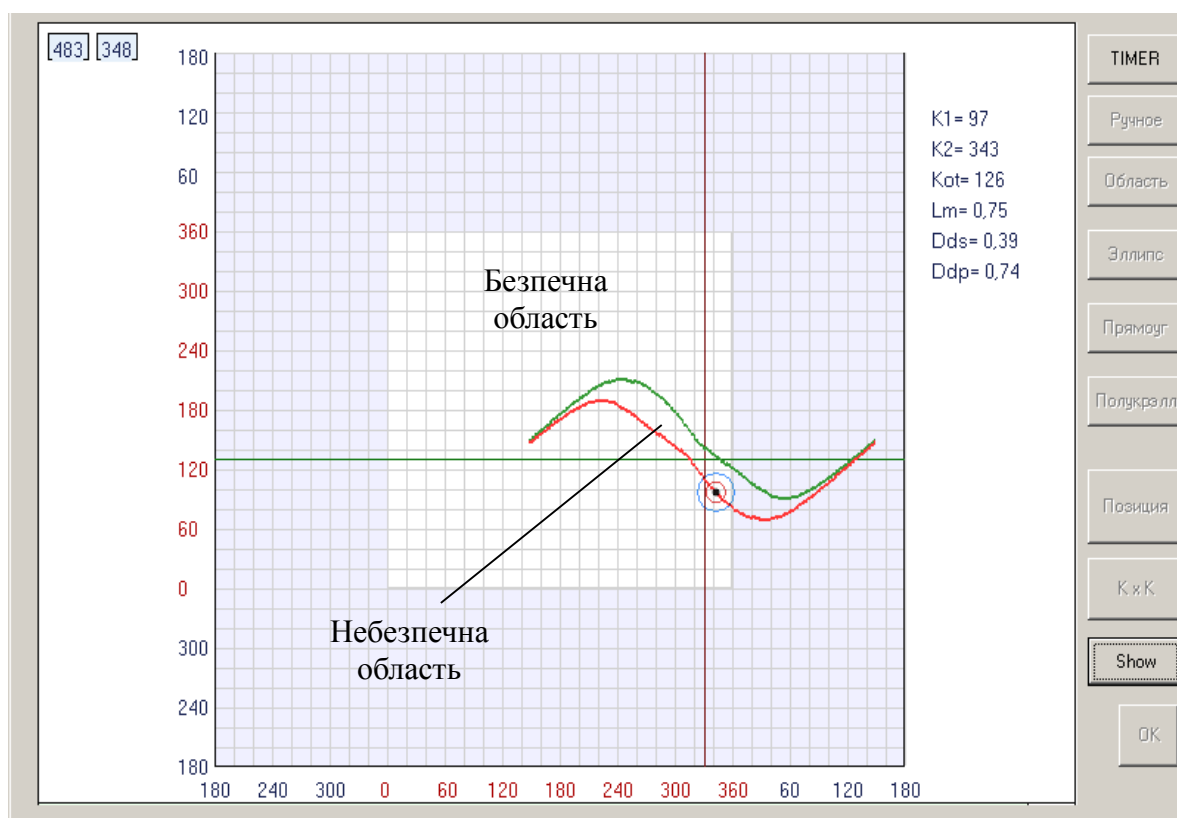


Рис. Д.76. Маневр розходження ухиленням вліво

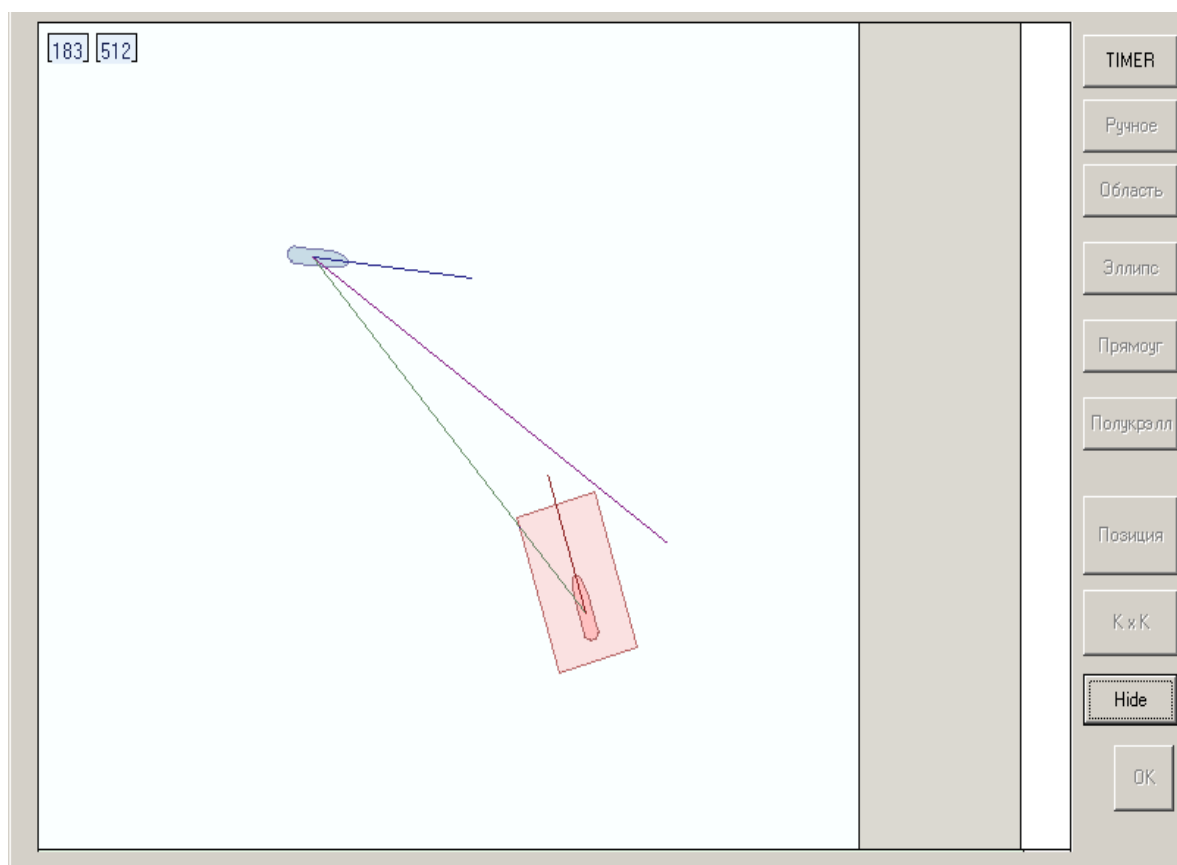


Рис. Д.77. Оптимальне положення лінії відносного курсу

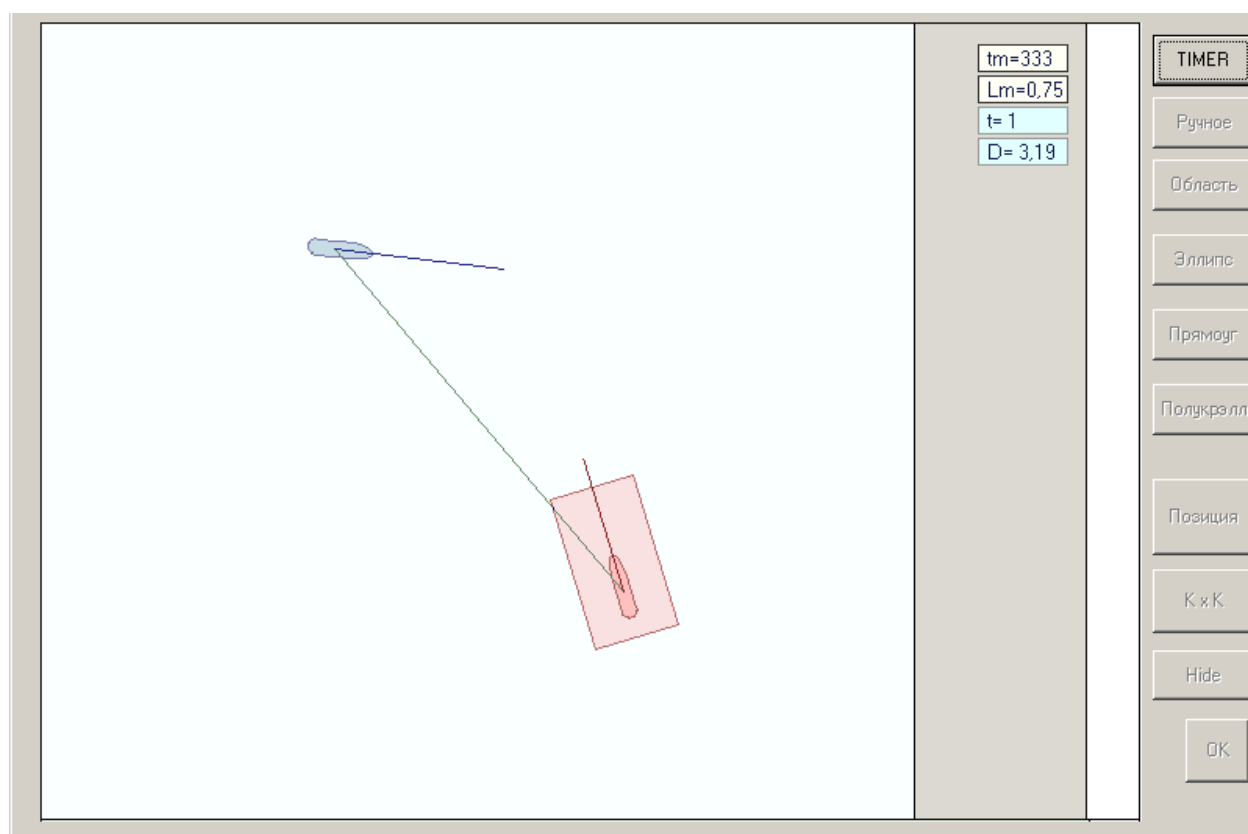


Рис. Д.78. Процесс разхождения суден на 1 с часу

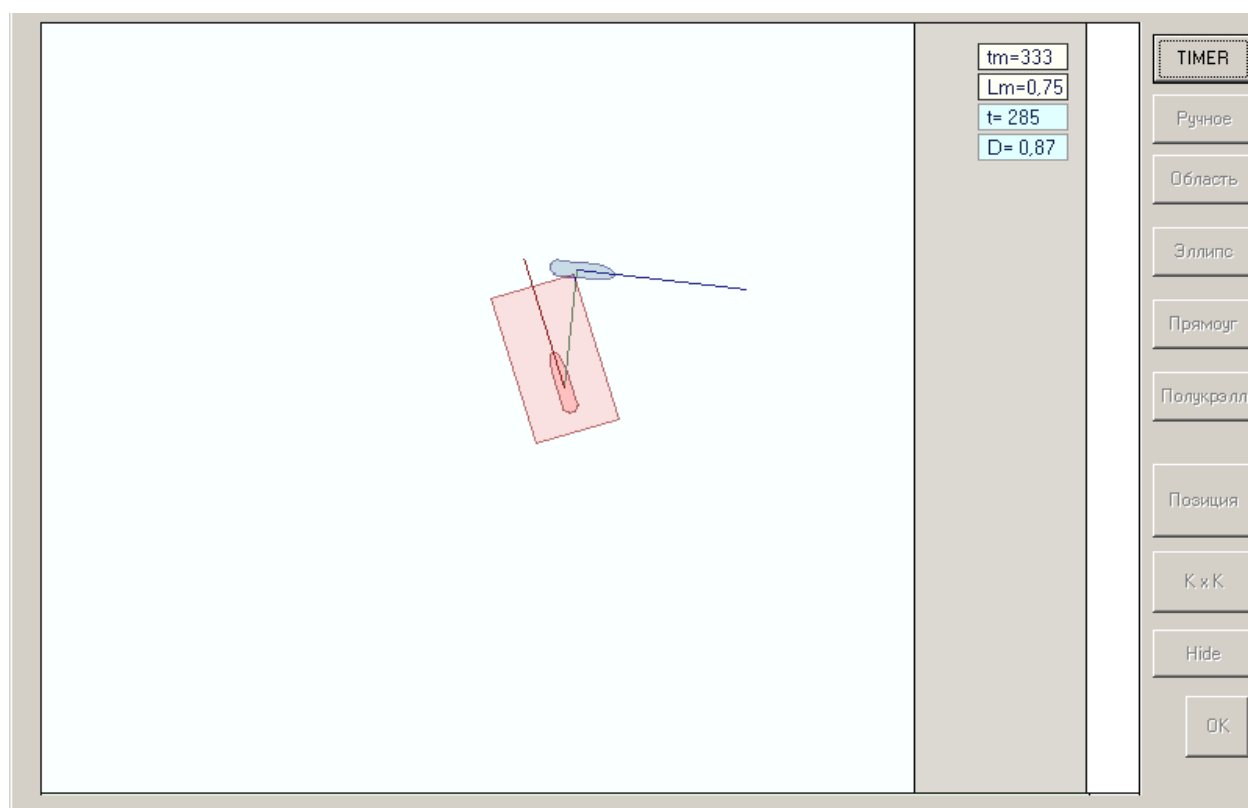


Рис. Д.79. Процесс разхождения на 285 с

На рис. Д.80. відображена ситуація на момент найкоротшого зближення суден.

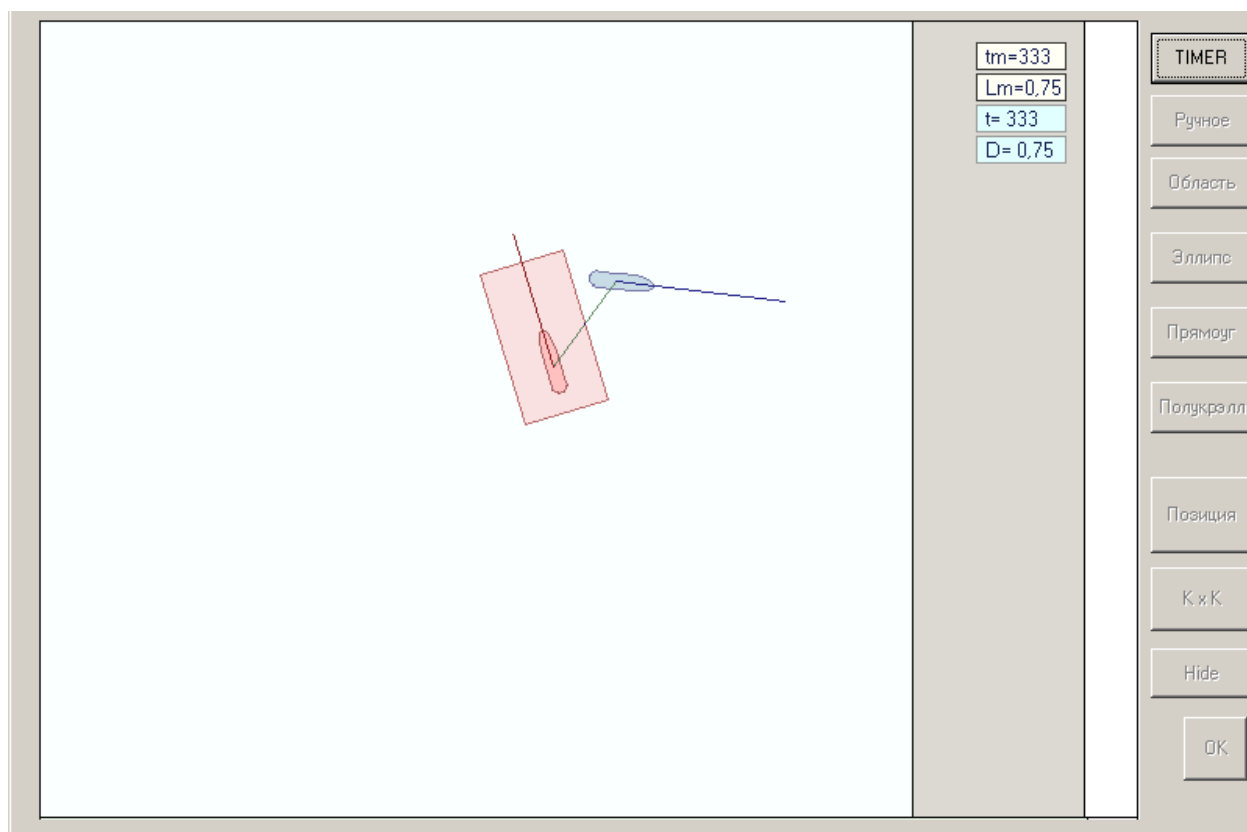


Рис. Д.80. Момент найкоротшого зближення суден

ДОДАТОК Е

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ТА ВІДОМОСТІ ПРО АПРОБАЦІЮ
РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Цымбал Н.Н. Гибкие стратегии расхождения судов / Цымбал Н.Н., Бурмака И.А., Тюпиков Е.Е. – Одесса: КП ОГТ, 2007. – 424 с.
2. Бурмака И.А. Экстренная стратегия расхождения при чрезмерном сближении судов / И.А. Бурмака, А.И. Бурмака, Р.Ю. Бужбецкий – LAP LAMBERT Academic Publishing, 2014. – 202 с.
3. Пятаков Э.Н. Взаимодействие судов при расхождении для предупреждения столкновения / Э.Н. Пятаков, Р.Ю. Бужбецкий, И.А. Бурмака, А.Ю. Булгаков – Херсон: Гринь Д.С., 2015. - 312 с.
4. Бурмака И.А. Управление судами в ситуации опасного сближения / И.А. Бурмака., Э.Н. Пятаков., А.Ю. Булгаков - LAP LAMBERT Academic Publishing, - Саарбрюккен (Германия), – 2016. - 585 с.
5. Бурмака И.А. Теория и методы внешнего оптимального управления судов в ситуации опасного сближения: монография / И.А. Бурмака - Одесса: НУ «ОМА», 2019 - 284 с.
6. Бурмака И.А. Расчет характеристик поворотливости судна по экспериментальным данным / Бурмака И.А. // Судовождение / ОНМА. Вип. 9 – Одесса: Фенікс, 2005. – С. 7 – 13.
7. Бурмака И.А. Результаты имитационного моделирования процесса расхождения судов с учетом их динамики / Бурмака И.А. // Судовождение / ОНМА. Вип. 10 – Одесса: Фенікс, 2005. – С. 21 – 25.
8. Бурмака И.А. Поликритериальное управление процессом судовождения / Бурмака И.А., Дудник С.А. // Судноводіння: Зб. наук. праць / ОНМА. – Вип. 12. - Одеса: «ВидавІнформ», 2006. - С. 26 – 30.
9. Бурмака И.А. Принцип внешнего управления процессом судовождения в стесненных условиях / Бурмака И.А. // Судовождение: Зб. наук. праць /

ОНМА. Вип. 13. – Одеса: «ВидавІнформ», – 2007. – С. 28 – 32.

10. Стебновский О.В. Особенности управления судами в стесненных водах / Стебновский О.В., Бурмака И.А. // Судноводіння: Зб. наук. праць / ОНМА, Вип. 16. – Одеса: «ВидавІнформ», 2009. - С. 157-161.

11. Стебновский О.В. Экспериментальные данные по поворотливости судна / Стебновский О.В., Бурмака И.А. // Судноводіння: Зб. наук. праць / ОНМА, Вип. 17. – Одеса: «ВидавІнформ», 2009. - С. 205 – 208.

12. Стебновский О.В. Расчет координат начала поворота судна из одного участка программной траектории на другой / Стебновский О.В., Бурмака И.А. // Судноводіння: Зб. наук. праць / ОНМА, Вип. 18. – Одеса: «ВидавІнформ», 2010. - С. 171-178.

13. Бурмака И.А. Определение параметров динамической модели поворотливости судна по натурным наблюдениям / Бурмака И.А., Бурмака А.И. // Судноводіння: Зб. наук. праць / ОНМА, Вип. 19. – Одеса: «ВидавІнформ», 2010 - С. 24-27.

14. Бурмака И.А. Учет инерционности судна при решении задач в ситуационно - технической системе предупреждения столкновений судов // Бурмака И.А. // Проблеми техніки: науково-виробничий журнал. – 2013. - №1. – С. 45-54.

15. Бурмака И.А. Взаимодействие судов с компенсацией ситуационного возмущения / Бурмака И.А., Калиниченко Г.Е. // Проблеми техніки: науково-виробничий журнал. - 2014. № 1. – С. 89 - 93.

16. Бурмака И.А. Учет динамики судна при плавании в стесненных водах / Бурмака И.А., Калиниченко Г.Е., Сааков В.А. // Проблеми техніки: науково-виробничий журнал. - 2014. № 4. – С. 48 - 54.

17. Бурмака И.А. Оценка момента времени попадания судна в ситуацию чрезмерного сближения / Бурмака И.А., Сафин И.В., Бурмака А.И. // Проблеми техніки: науково-виробничий журнал. - 2014. № 4. – С. 108 - 118.

18. Бурмака И.А. Определение области курсов двух судов, обеспечивающих безопасное расхождение/ Бурмака И.А., Булгаков А.Ю. // Эксплуатація,

безопасность и экономика водного транспорта. Вестник Государственного морского университета им. адмирала Ф. Ф. Ушакова. Новороссийск. – 2014. – выпуск 2 (7). – С. 17 - 20.

19. Бурмака И.А. Управление группы судов в ситуации опасного сближения / Бурмака И.А., Булгаков А.Ю. // Вестник Государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. Санкт-Петербург. – 2014. – выпуск 6 (28). – С. 9 - 13.

20. Бурмака И.А. Маневр расхождения трех судов изменением курсов / Бурмака И.А., Булгаков А.Ю. // Автоматизация судовых технических средств: науч.-техн. сб. – 2014. – Вып. 20. Одесса: ОНМА. - С. 18 - 23.

21. Бурмака И.А. Зависимость точности обсервации от существенных факторов / Бурмака И.А., Алексейчук Б.М. // Водный транспорт: Сб. научн. трудов, Вып. 2(20). – К.: КДАВТ, 2014 - С. 18 - 23.

22. Бурмака И.А. Выбор оптимального вектора управления судами изменением курсов для безопасного расхождения / Бурмака И.А., Булгаков А.Ю. // Автоматизация судовых технических средств: науч.-техн. сб. – 2015. – № 21 – С. 29 – 33.

23. Бурмака И.А. Определение эффективности обсервованных координат судна при избыточных измерениях / Бурмака И.А., Астайкин Д.В., Алексейчук Б.М. // Судноводіння: Зб. наук. праць / ОНМА, Вип. 26. – Одесса: «ВидавІнформ», 2016 - С. 28 - 34.

24. Бурмака И.А. Основные характеристики группы судов при внешнем управлении процессом судовождения / Бурмака И.А., Калиниченко Г.Е., Кулаков М.А. // Судноводіння: Зб. наук. праць / ОНМА, Вип. 26. – Одесса: «ВидавІнформ», 2015 - С. 35 - 40.

25. Бурмака И.А. Управление парой судов в ситуации опасного сближения / Бурмака И.А., Калиниченко Г.Е., Кулаков М.А. // Вестник Государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. Санкт-Петербург. – 2016. – Выпуск 3 (37). – С. 64 - 71.

26. Бурмака И.А. Выбор безопасного курса судна с учетом его инерцион-

ности при использовании областей опасных курсов / Бурмака И.А. // Автоматизация судовых технических средств: науч.-техн. сб. – 2016. – № 22. – С. 17 – 21.

27. Бурмака И.А. Оценка эффективности обсервованных координат судна при избыточных измерениях / Бурмака И.А., Астайкин Д.В., Алексейчук Б.М. // Вестник Государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. Санкт-Петербург. – 2016. – Выпуск 1 (35). – С. 24 - 29.

28. Y. Kalinichenko. Analysis of mathematical models of changing the vessel's course when turning / Y. Kalinichenko, I. Burmaka // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. - 2016. - 6/9 (84). - P. 20 - 31.

29. Бурмака И.А. Условие существования множества маневров расхождения судов изменением скоростей/ Бурмака И.А. // Судноводіння: Зб. наук. праць / ОНМА, Вип. 27. – Одесса: «ВидавІнформ», 2017. – С. 32 – 37.

30. Бурмака И.А. Использование областей опасных курсов и опасных скоростей для выбора маневра расхождения/ Бурмака И.А., Пасечнюк С.С., Кулаков М.А. // Эксплуатация морского транспорта. Государственный морской университет им. адмирала Ф. Ф. Ушакова. Новороссийск. – 2017. – выпуск 2 (83). – С. 76 - 81.

31. Бурмака И.А. Предупреждение столкновений судов методами внешнего управления процессом расхождения / Бурмака И.А., Калиниченко Г.Е., Кулаков М.А. // Science and Education a New Dimension. Natural and Technical Sciences, V (14), Issue: 132, 2017. - С. 56 - 60.

32. Бурмака И.А. Применение областей недопустимых значений параметров для предупреждения столкновений судов при их внешнем управлении / Бурмака И.А., Кулаков М.А., Пасечнюк С.С. // East European Scientific Journal, №11 (27), 2017, part 1. - С. 40 - 48.

33. Бурмака И. А. Оптимальный маневр расхождения судов изменением их скоростей / Бурмака И. А. // XXVII Международная конференция «Развитие науки в XXI веке», 15 сентября 2017г. – Харьков – С. 24 - 27.

34. Бурмака И.А. Формализация области опасных курсов и скоростей судов при внешнем управлении их процессом расхождения / Бурмака И.А., Пасечнюк С.С. // Судовождение: Зб. наук. праць / НУ «ОМА». - Вип. 28. - Одеса: «ВидавІнформ», 2018. - С. 16 - 24.

35. Бурмака И.А. Способ аналитического расчета оптимального маневра расхождения пары судов изменением скоростей / Бурмака И.А. // Автоматизация судовых технических средств: науч.-техн. сб. - 2017. - № 23. - С. 9 - 14.

36. Бурмака И.А. Выбор стратегии расхождения группы судов методами внешнего управления/ Бурмака И.А. // Science and Education a New Dimension. Natural and Technical Sciences, V (16), Issue: 148, 2017. - С. 66 - 71.

37. Бурмака И.А. Применение областей недопустимых значений параметров движения судов для безопасного расхождения / Бурмака И.А., Пятаков Э.Н. // Austria - science, Issue: 11, 2018. - С. 34 - 39.

38. Бурмака И.А. Выбор совместной стратегии расхождения судов изменением параметров движения при их внешнем управлении / И.А. Бурмака, С.С. Пасечнюк // Science and Education a New Dimension. Natural and Technical Sciences, VI (18), Issue: 158, 2018. - С. 41- 46.

39. Бурмака И.А. Методы внешнего управления судами в ситуации опасного сближения / Бурмака И.А., Кулаков М.А., Калиниченко Г.Е.// Науковий вісник Херсонської державної морської академії. - 2017. - № 2(17). - С. 4 - 14.

40. Бурмака И.А. Учет инерционно-тормозных характеристик при выборе маневра расхождения изменением скоростей судов / Бурмака И.А. // Austria - science, Issue: 16, 2018. - С. 34 - 38.

41. Бурмака И.А. Применение области недопустимых значений параметров движения судов для безопасного расхождения при наличии мешающего судна / Бурмака И.А. // Science and Education a New Dimension. Natural and Technical Sciences, VI (22), Issue: 186, 2018. - С. 53 - 58.

42. Бурмака И.А. Маневр последовательного расхождения с двумя целями изменением курса и пассивным торможением / Бурмака И.А., Пятаков

Э.Н. // East European Scientific Journal, № 5 (33), 2018, part 1. - С. 19 - 25.

43. Бурмака И.А. Определение предельно-допустимой дистанции сближения при эллиптической форме судового домена / Бурмака И.А. // Austria - science, Issue: 23, 2019. - С. 36 - 43.

44. Singh B., Burmaka I. Use of an electronic chart for choosing an effective maneuver for a vessel to pass at a safe distance among several targets // Sailor Today, Oct. 2018. - P. 41 - 42.

45. Бурмака И.А. Использование регрессионного анализа для обработки данных поворотливости судна / Бурмака И.А., Худенко Н.П. // Вісник ОНМУ: Зб. наук. праць ОНМУ, - 2014. - Вып. 1(40). – С. 83 - 88.

46. Бурмака И.А. Выбор оптимальной стратегии расхождения группы судов / Бурмака И.А. // Судноплавство: перевезення, технічні засоби, безпека: Матеріали наук.-техн. конф., 19-20 листоп. 2013 – Одеса: ОНМА, 2014. – С. 83–85.

47. Бурмака И.А. Характеристики безопасности системы взаимодействующих судов / Бурмака И.А. // Эффективная и безопасная эксплуатация морских судов и сооружений: Материалы VI Всеукраинской научно-технической конференции, 2-4 октября 2013 г. - Севастополь: СевНТУ, 2013. - С. 133-136.

48. Бурмака И.А. Маневр расхождения нескольких судов изменением курсов / Бурмака И.А., Булгаков А.Ю. // Морські перевезення та інформаційні технології в судноплавстві: Матеріали наук.-техн. конф., 18-19 листоп. 2014 – Одеса: ОНМА, 2014. – С. 108–111.

49. Бурмака И.А. Маневрирование судна при плавании в стесненных условиях / Бурмака И.А., Сааков В.А., Калиниченко Г.Е. // Морські перевезення та інформаційні технології в судноплавстві: Матеріали наук.-техн. конф., 18-19 листоп. 2014 – Одеса: ОНМА, 2014. – С. 111-113.

50. Бурмака И.А. Влияние числа линий положения на точность обсервации / Бурмака И.А., Алексейчук Б.М. // Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті (MINTT-2014): Матеріали VI Міжнародної наук.-

практ. конф., 27-29 травня. 2014 – Херсон: ХДМА, 2014. – С. 107–110.

51. Бурмака И.А. Маневр расхождения нескольких судов изменением курсов / Бурмака И.А., Булгаков А.Ю. // Сучасні технології проектування, побудови, експлуатації і ремонту суден, морських технічних засобів і інженерних споруд: Матеріали Всеукраїнської наук.-тех. конф. з міжнародною участю, 20-22 травня 2015 р. – Миколаїв : МУК, 2015. – С. 22–24.

52. Бурмака И.А. Определение оптимального вектора управления судами для безопасного расхождения / Бурмака И.А., Булгаков А.Ю. // Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті (MINTT-2015): Матеріали VII Міжнародної наук.-практ. конф., 26-28 травня. 2015 – Херсон: ХДМА, 2015. – С. 96–98.

53. Бурмака И.А. Учет инерционности судна и навигационных опасностей при расчете опасных областей курсов / Бурмака И.А., Калиниченко Г.Е.// Морські перевезення та інформаційні технології в судноплавстві: Матеріали наук.-техн. конф., 19-20 листоп. 2015 – Одеса: ОНМА, 2015. – С. 114-115.

54. Бурмака И.А. Использование областей опасных скоростей для расхождения судов в стесненных условиях / Бурмака И.А., Кулаков М.А.// Морські перевезення та інформаційні технології в судноплавстві: Матеріали наук.-техн. конф., 19-20 листоп. 2015 – Одеса: ОНМА, 2015. – С. 115–117.

55. Бурмака И.А. Требования, обеспечивающие наличие множества маневров расхождения судов изменением скоростей / Бурмака И.А. // Річковий та морський транспорт: інфраструктура, судноплавство, перевезення, безпека: Матеріали наук.-техн. конф., 16-17 листоп. 2016 – Одеса: ОНМА, 2016. – С. 120–122.

56. Бурмака И.А. Типы управления парой судов в ситуации опасного сближения / Бурмака И.А. // Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті (MINTT-2016): Матеріали VIII Міжнародної наук.-практ. конф., 24-26 травня. 2016 – Херсон: ХДМА, 2016. – С. 109–112.

57. Бурмака И.А. Условие существования множества маневров расхождения судов изменением скоростей / Бурмака И.А.// Сучасні інформаційні та ін-

новаційні технології на транспорті (MINTT-2017): Матеріали IX Міжнародної наук.-практ. конф., 23-25 травня. 2017 – Херсон: ХДМА, 2017. – С. 91–92.

58. Бурмака И. А. Определение допустимого множества маневров расхождения судов изменением скоростей / Бурмака И.А., Кулаков М.А., Калинин Г.М. // Сучасні технології проектування, побудови, експлуатації і ремонту суден, морських технічних засобів і інженерних споруд: Матеріали Всеукраїнської наук.-тех. конф. з міжнародною участю, 17-18 травня 2017 р. – Миколаїв : МУК, 2017. – С. 21–23.

59. Бурмака И.А. Внешнее управление процессом расхождения судов с помощью области их опасных курсов и скоростей / Бурмака И.А., Пасечнюк С.С. // Транспортні технології (морський та річковий флот): інфраструктура, судноплавство, перевезення, автоматизація: Матеріали наук.-техн. конф., 16-17 листоп. 2017 – Одеса: НУ «ОМА», 2018. – С. 139 – 142.

60. Бурмака И.А. Уравнение границы области недопустимых значений параметров движения сближающихся судов / Бурмака И.А.// Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті (MINTT-2018): Матеріали X Міжнародної наук.-практ. конф., 29-31 травня. 2018 – Херсон: ХДМА, 2018. – С. 93–95.

61. Бурмака И.А. Формирование области недопустимых значений скоростей судов с учетом их инерционно-тормозных характеристик / Бурмака И.А. // Транспортні технології (морський та річковий флот): інфраструктура, судноплавство, перевезення, автоматизація: Матеріали наук.-техн. конф., 15-16 листоп. 2018 – Одеса: НУ «ОМА», 2018. – С. 190 – 193.

62. I. Burmaka Safe passing with momentum consideration / Igor Burmaka, Dmytro Zhukov, Mykhaylo Miyusov, Marina Chesnokova // The international Association of Maritime Universities (IAMU) Conference book. The 20th Commemorative Annual General Assembly (AGA 20), 30 October – 1 November 2019, Tokyo, Japan. P. 73-74.

ДОДАТОК Ж

АКТИ ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ
ДИСЕРТАЦІЙНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ

А К Т ВПРОВАДЖЕННЯ

Цим актом підтверджується упровадження в компанії «СМА Шипс Україна» методів визначення оптимального маневру розходження суден зміною їх параметрів руху з використанням принципу зовнішнього управління, які розроблено в дисертаційній роботі Бурмаки Ігоря Олексійовича на тему «Розвиток теорії і методів зовнішнього управління суднами в ситуації небезпечного зближення».

Методи використовуються при перепідготовці судноводіїв компанії.

Директор компанії

«СМА Шипс Україна»

к.т.н., капітан далекого плавання

03.05.2020



Є.Є. Тюпиков

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Ректор Херсонської державної
морської академії д.п.н., професор
В.В. Чернявський

« 27 »

2020 р.

А К Т

про впровадження результатів дисертаційної роботи Бурмака Ігоря Олексійовича на тему «Розвиток теорії і методів зовнішнього управління суднами в ситуації небезпечного зближення» у навчальному процесі академії

Ми, що нижче підписалися, начальник навчального відділу Струмінська Л.Ю., декан факультету судноводіння доцент Нагрибельний Я.А. і завідувач кафедри управління судном к.т.н., к.д.п. Товстокорий О.М. склали цей акт в тому, що результати дисертації Бурмаки Ігоря Олексійовича на тему «Розвиток теорії і методів зовнішнього управління суднами в ситуації небезпечного зближення» впроваджені у навчальний процес на кафедрі управління судном в дисциплінах по забезпеченню безаварійного плавання судна.

Начальник навчального відділу

Струмінська Л.Ю.

Декан факультету судноводіння,
доцент

Нагрибельний Я.А.

Завідувач кафедри
управління судном,
к.т.н., к.д.п.

Товстокорий О.М.

АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ

Цим актом підтверджується, що в приватному вищому навчальному закладі Інститут післядипломної освіти «Одеський морський тренажерний центр» одержали запровадження в навчальний процес наступні результати дисертаційної роботи Бурмака Ігоря Олексійовича на тему «Розвиток теорії і методів зовнішнього управління суднами в ситуації небезпечного зближення»:

- використання методів зовнішнього управління процесом розходження суден;

- метод вибору оптимального маневру розходження декількох суден зміною їх курсів.

Директор

Інституту післядипломної освіти

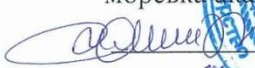
«Одеський морський тренажерний центр»,

к.т.н., професор

17.06.2020



Пашенко Ю.В.

«ЗАТВЕРДЖУЮ»
 Директор Дунайського Інституту
 Національного Університету «Одеська
 морська академія»  Чимшир В.І.
 «01»  2020 р.

А К Т

про впровадження результатів дисертаційної роботи здобувача Бурмаки Ігоря Олексійовича на тему «Розвиток теорії і методів зовнішнього управління суднами в ситуації небезпечного зближення» у навчальному процесі інституту.

Ми, що нижче підписалися, заступник директора з науково-педагогічної роботи д.п.н., доцент Смирнова І.М., завідувач кафедри навігації та управління судном к.п.н., доцент Даниленко О.Б. і завідувач кафедри інженерних дисциплін к.т.н., доцент Тарасенко Т.В. склали цей акт в тому, що у освітній процес інституту впроваджені наступні результати дисертаційної роботи здобувача Бурмака Ігоря Олексійовича на тему «Розвиток теорії і методів зовнішнього управління суднами в ситуації небезпечного зближення» методи формування областей небезпечних параметрів руху суден і використання їх для вибору оптимального маневру розходження.

Заступник директора з НПП
 д.п.н., доцент



Смирнова І.М.

Завідувач кафедри НіУС
 к.п.н., доцент



Даниленко О.Б.

Завідувач кафедри ІД
 к.т.н., доцент



Тарасенко Т.В.

МІНІСТЕРСТВО ІНФРАСТРУКТУРИ УКРАЇНИ
Державне підприємство «Адміністрація морських портів України»
Філія «Дельта – лоцман»
Державного підприємства «Адміністрація морських портів України»

АКТ УПРОВАДЖЕННЯ

Цим актом підтверджується, що в філії «Дельта-лоцман» Державного підприємства «Адміністрації морських портів України» упроваджені рекомендації по зовнішньому управлінні суден, які одержані по результатам дисертаційної роботи Бурмаки Ігоря Олексійовича на тему «Розвиток теорії і методів зовнішнього управління суднами в ситуації небезпечного зближення».

Упроваджено спосіб визначення параметрів маневру розходження двох суден в ситуації їх небезпечного зближення з урахуванням третього судна, яке може бути небезпечним або тим, що заважає. Запропонований спосіб передбачає використання принципу зовнішнього управління процесом розходження суден із допомогою областей неприпустимих значень їх курсів або швидкостей. Також рекомендовано використання області неприпустимих значень курсів одного із суден і швидкостей іншого судна.

Рекомендовані способи визначення параметрів маневру розходження суден передбачають урахування наявних навігаційних перешкод та динаміки суден, що розходяться.

Начальник служби безпеки мореплавства
філіалу «Дельта-лоцман» ДП «АМПУ»
Міністерства Інфраструктури України
Капітан далекого плавання,
кандидат технічних наук
14.09.2020



Репетей В.Д.

ЗАТВЕРДЖУЮ

Перший проректор Національного
університету «Одеська морська академія»
д.ю.н., професор

« 03 » _____ 2020 р.

О.М. Шемякін



А К Т

про використання результатів дисертаційної роботи
Бурмаки Ігоря Олексійовича на тему «Розвиток теорії і методів
зовнішнього управління суднами в ситуації небезпечного зближення»
в освітньому процесі університету

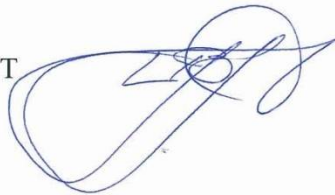
Ми, що нижче підписались, начальник навчального відділу університету Пархоменко М.М. та декан факультету МП та Т доцент Ворохобін І.І., склали цей акт у тому, що результати дисертаційної роботи Бурмаки І.О. впровадженні у освітньому процесі кафедри «Управління судном» в дисципліні «Маневрування та управлінням судном».

Начальник навчального відділу
Національного університету
«Одеська морська академія»



М.М. Пархоменко

Декан факультету МП та Т
к.т.н., доцент



І.І. Ворохобін



(11) 134691

(19) UA

(51) МПК
G08G 3/02 (2006.01)

(21) Номер заявки: u 2019 00786

(22) Дата подання заявки: 25.01.2019

(24) Дата, з якої є чинними права на корисну модель: 27.05.2019

(46) Дата публікації відомостей про видачу патенту та номер бюлетеня: 27.05.2019, Бюл. № 10

(72) Винахідники:

Ворохобін Ігор Ігорович, UA,
Бурмака Ігор Олексійович,
UA,
П'ятаков Едуард
Миколайович, UA

(73) Власники:

Ворохобін Ігор Ігорович,
вул. Махачкалинська, 7-А, кв.
21, м. Одеса, 65111, Україна,
UA,
Бурмака Ігор Олексійович,
вул. Піонерська, 5, коп. 6, кв.
85, м. Одеса, 65009, Україна,
UA,
П'ятаков Едуард
Миколайович,
вул. Котовського, 150, м.
Херсон, 73013, Україна, UA

(54) Назва корисної моделі:

ПРИСТРІЙ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ВИСОКОТОЧНИХ ПАРАМЕТРІВ МАНЕВРУ РОЗХОДЖЕННЯ СУДЕН ПРИ ЇХ ЗОВНІШНЬОМУ УПРАВЛІННІ

(57) Формула корисної моделі:

Пристрій для визначення високоточних параметрів маневру розходження суден зовнішнім управлінням, що містить модуль вимірювання параметрів ситуації зближення суден, який складається із блока визначення поточних параметрів руху суден, блока інформації про поточні положення суден відносно зовнішнього управління та блока розрахунку пеленга та відстані між суднами, які зв'язані з системою первинної обробки, що включає блок формування масиву заданого розміру із значень пеленга і дистанції між суднами та параметрів їх руху, та зв'язаний з ним блок розрахунку високоточних значень вимірюваних величин, який безпосередньо сполучений із системою вторинної обробки, що реалізована за допомогою комп'ютера і містить блок визначення наявності небезпеки зіткнення суден та з'єднаний з ним блок розрахунку ефективності альтернативних типів маневру розходження і розрахунку меж області допустимих параметрів найбільш ефективного маневру розходження що має зв'язок з індикатором, до складу якого входять дисплей, блок вибору безпечного маневру розходження суден за допомогою відповідної області допустимих параметрів, блок імітаційного моделювання маневру розходження з вибраними параметрами, який відрізняється тим, що система первинної обробки додатково забезпечена блоком формування масиву заданого розміру із значень пеленга та дистанції між суднами і параметрів їх руху та розрахунку високоточних значень вимірюваних величин масиву методом ортогонального розкладання щільності розподілу похибки вимірювання, а для оперативного розрахунку параметрів маневру розходження зовнішнім управлінням використано блок визначення ефективності альтернативних типів маневру розходження і розрахунку меж області допустимих параметрів найбільш ефективного маневру розходження.

(11) 134691

Державне підприємство
«Український інститут інтелектуальної власності»
(Укрпатент)

Оригіналом цього документа є електронний документ з відповідними реквізитами, у тому числі з накладеним електронним цифровим підписом уповноваженої особи Міністерства економічного розвитку і торгівлі України та сформованою позначкою часу.

Ідентифікатор електронного документа 4329220519.

Для отримання оригіналу документа необхідно:

1. Зайти до ІДС «Стан діловодства за заявками на винаходи та корисні моделі», яка розташована на сторінці <http://base.uipv.org/searchInvStat/>.
2. Виконати пошук за номером заявки.
3. У розділі «Документи Укрпатенту» поруч з реєстраційним номером документа натиснути кнопку «Завантажити оригінал» та ввести ідентифікатор електронного документа.

Ідентичний за документарною інформацією та реквізитами паперовий примірник цього документа містить 2 арк., які пронумеровані та прошиті металевими люверсами.

Уповноважена особа Укрпатенту

І.Є. Матусевич

27.05.2019





МІНІСТЕРСТВО
ЕКОНОМІЧНОГО
РОЗВИТКУ І ТОРГІВЛІ
УКРАЇНИ

УКРАЇНА

(19) **UA**

(11) **134691**

(13) **U**

(51) МПК

G08G 3/02 (2006.01)

(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

(21) Номер заявки: u 2019 00786	(72) Винахідник(и): Ворохобін Ігор Ігорович (UA),
(22) Дата подання заявки: 25.01.2019	Бурмака Ігор Олексійович (UA),
(24) Дата, з якої є чинними права на корисну модель: 27.05.2019	П'ятаков Едуард Миколайович (UA)
(46) Публікація відомостей про видачу патенту: 27.05.2019, Бюл.№ 10	(73) Власник(и): Ворохобін Ігор Ігорович,
	вул. Махачкалинська, 7-А, кв. 21, м. Одеса,
	65111, Україна (UA),
	Бурмака Ігор Олексійович,
	вул. Піонерська, 5, коп. 6, кв. 85, м. Одеса,
	65009, Україна (UA),
	П'ятаков Едуард Миколайович,
	вул. Котовського, 150, м. Херсон, 73013,
	Україна (UA)
	(74) Представник: Шаповалов Руслан Юрійович

(54) ПРИСТРІЙ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ВИСОКОТОЧНИХ ПАРАМЕТРІВ МАНЕВРУ РОЗХОДЖЕННЯ СУДЕН ПРИ ЇХ ЗОВНІШНЬОМУ УПРАВЛІННІ

(57) Реферат:

Пристрій для визначення високоточних параметрів маневру розходження суден зовнішнім управлінням складається із модуля вимірювання параметрів ситуації зближення суден, який містить в своєму складі блок визначення поточних параметрів руху суден, тобто їх курсів та швидкостей, блок інформації про поточні положення суден відносно зовнішнього управління та блок розрахунку пеленга та відстані між суднами. Модуль вимірювання параметрів ситуації зближення суден має зв'язок із системою їх первинної обробки, що включає блок формування масиву заданого розміру із значень пеленга і дистанції між суднами та параметрів їх руху та зв'язаний з ним блок розрахунку високоточних значень вимірюваних величин, який безпосередньо сполучений із системою вторинної обробки. Ця система містить блок визначення наявності небезпеки зіткнення суден та з'єднаний з ним блок розрахунку ефективності використання трьох альтернативних типів маневру розходження (змінюю курсів або швидкостей обох суден чи курсу одного судна та швидкості іншого) та розрахунку меж області допустимих параметрів найбільш ефективного маневру розходження. Останній блок має зв'язок з індикатором. Блок розрахунку високоточних значень вимірюваних величин та система вторинної обробки реалізовані у вигляді комп'ютерних програм. Індикатор складається з дисплея, блока вибору безпечного маневру розходження зміню параметрів руху суден за допомогою відповідної області допустимих параметрів, яка виводиться на дисплей. На дисплеї також виводяться параметри вибраного маневру розходження. Індикатор також містить блок імітаційного моделювання маневру розходження з вибраними параметрами.

UA 134691 U

UA 134691 U

Корисна модель належить до засобів попередження зіткнення суден і призначена для використання, як засіб оперативного вибору маневру розходження суден зовнішнім управлінням при їх плаванні в стисних водах.

5 Як найближчий аналог вибрано засіб автоматизованої радіолокаційної проводки, який одержує із радіолокаційної станції інформацію, по якій блок визначення параметрів руху цілей виробляє поточну інформацію і передає її на індикатор. Індикатор містить дисплей, блок розрахунку параметрів найкоротшого зближення суден та блок програвання вибраного маневру розходження.

10 Недоліком зазначеної системи є те, що при визначенні небезпечного зближення судна з ціллю в системі не передбачено вирішення задачі вибору безпечного маневру розходження.

В основу корисної моделі поставлена задача створення пристрою для запобігання зіткненням суден шляхом розрахунку високоточних значень параметрів ситуації зближення суден, виявлення небезпечної ситуації зближення і в разі необхідності оцінки ефективності використання трьох альтернативних типів маневру розходження та обчислення меж відповідної області допустимих параметрів маневру розходження, за допомогою якої визначаються параметри безпечного маневру.

20 Поставлена задача вирішується тим, що в пристрої для визначення високоточних параметрів маневру розходження суден зовнішнім управлінням міститься модуль вимірювання параметрів ситуації зближення суден, в склад якого входять блок визначення поточних значень їх курсів та швидкостей, блок інформації про поточне положення суден відносно зовнішнього управління та блок розрахунку пеленга та відстані між суднами.

Модуль вимірювання параметрів ситуації зближення суден сполучається із системою їх первинної обробки, яка має блок формування масиву значень пеленга і дистанції між суднами та параметрів їх руху та блок розрахунку високоточних значень вимірюваних величин масиву, причому останній блок безпосередньо сполучений із системою вторинної обробки. В склад цієї системи входить блок визначення наявності небезпеки зіткнення суден та зв'язаний з ним блок розрахунку ефективності застосування різних типів маневру розходження і формування області допустимих параметрів найбільш ефективного маневру розходження. Останній блок має зв'язок з індикатором, до складу якого входять дисплей, блок вибору безпечного маневру розходження суден за допомогою відповідної області допустимих параметрів, що виводиться на дисплей. Індикатор також містить блок імітаційного моделювання маневру розходження з вибраними параметрами. Блок розрахунку високоточних значень вимірюваних величин та система вторинної обробки реалізовані у вигляді комп'ютерних програм.

30 Причинно-наслідковий зв'язок між сукупністю ознак корисної моделі і технічним результатом, що досягається, полягає у наступному.

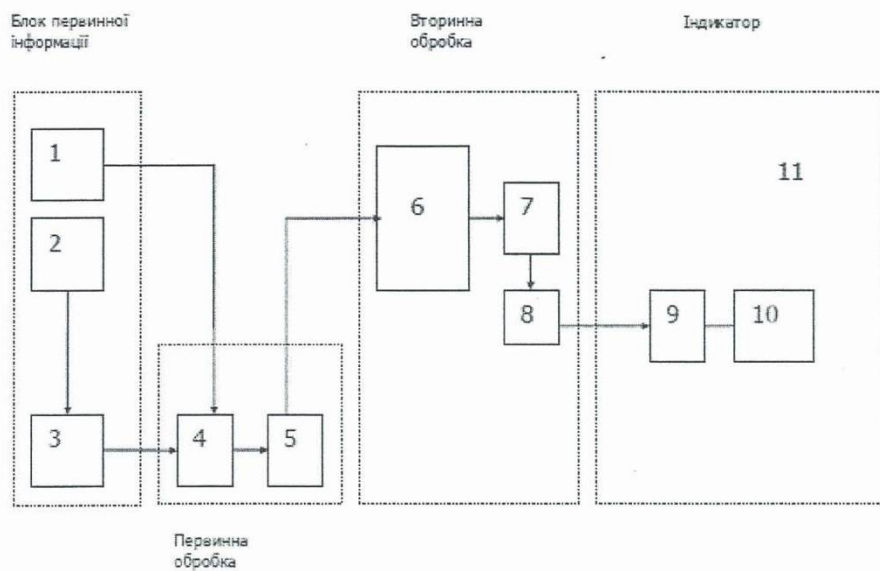
35 Система первинної обробки параметрів ситуації зближення суден забезпечує мінімальний ризик виникнення можливої ситуації аварійного зближення суден в стисних умовах плавання. В разі небезпечного зближення блок розрахунку ефективності використання альтернативних типів маневру розходження та блок вибору безпечного маневру розходження суден за допомогою відповідної області допустимих параметрів дає змогу оператору зовнішнього управління суднами оперативно і своєчасно визначити маневр попередження зіткнення, параметри якого повідомити на судна для виконання. За допомогою блока імітаційного моделювання маневру розходження можлива попередня перевірка коректності вибраного маневру в прискореному масштабі часу.

45 Суть корисної моделі пояснюється кресленням, де показана блок-схема пристрою.

Пристрій для визначення високоточних параметрів маневру розходження суден зовнішнім управлінням складається із модуля вимірювання параметрів ситуації зближення суден, який містить в своєму складі блок визначення поточних параметрів руху суден 1, тобто їх курсів та швидкостей, блок інформації 2 про поточні положення суден відносно зовнішнього управління та блок розрахунку 3 пеленга та відстані між суднами.

50 Із модулем вимірювання параметрів ситуації зближення суден зв'язана система їх первинної обробки, що включає блок формування масиву заданого розміру із значень пеленга і дистанції між суднами та параметрів їх руху 4, а також зв'язаний з ним блок розрахунку високоточних значень вимірюваних величин 5, який сполучений із системою вторинної обробки. Ця система містить блок визначення наявності небезпеки зіткнення суден 6 та з'єднаний з ним блок розрахунку ефективності використання трьох альтернативних типів маневру розходження 7 (змінюю курсів або швидкостей обох суден чи курсу одного судна та швидкості іншого) та блока формування меж області допустимих параметрів 8 найбільш ефективного маневру розходження. Останній блок має зв'язок з індикатором.

UA 134691 U



Комп'ютерна верстка В. Юкін

Міністерство економічного розвитку і торгівлі України, вул. М. Грушевського, 12/2, м. Київ, 01008, Україна

ДП "Український інститут інтелектуальної власності", вул. Глазунова, 1, м. Київ – 42, 01601



(11) **134690**(19) **UA**(51) МПК
G08G 3/02 (2006.01)(21) Номер заявки: **u 2019 00783**(22) Дата подання заявки: **25.01.2019**(24) Дата, з якої є чинними
права на корисну модель: **27.05.2019**(46) Дата публікації відомостей
про видачу патенту та
номер бюлетеня: **27.05.2019,
Бюл. № 10**

(72) Винахідники:

**Ворохобін Ігор Ігорович, UA,
Бурмака Ігор Олексійович,
UA,
П'ятаков Едуард
Миколайович, UA**

(73) Власники:

**Ворохобін Ігор Ігорович,
вул. Махачкалинська, 7-А, кв.
21, м. Одеса, 65111, Україна,
UA,
Бурмака Ігор Олексійович,
вул. Піонерська, 5, коп. 6, кв.
85, м. Одеса, 65009, Україна,
UA,
П'ятаков Едуард
Миколайович,
вул. Котовського, 150, м.
Херсон, 73013, Україна, UA**

(54) Назва корисної моделі:

ПРИСТРІЙ ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ВИСОКОТОЧНОГО БЕЗАВАРІЙНОГО РОЗХОДЖЕННЯ СУДЕН

(57) Формула корисної моделі:

Пристрій для забезпечення високоточного безаварійного розходження суден, що містить систему визначення поточної інформації, яка складається із блока визначення поточного курсу та швидкості власного судна, блока інформації про параметри руху зустрічного судна та блока вимірювання пеленгу та відстані між суднами, які зв'язані з системою первинної обробки, яка включає блок накопичення масиву значень пеленгу і дистанції між суднами та зв'язаний з ним блок розрахунку високоточних значень пеленгу і дистанції, що безпосередньо сполучений із системою вторинної обробки, яка реалізована за допомогою комп'ютера і містить блок оцінки небезпеки ситуації зближення з визначенням рівня ситуативного збурення та з'єднаний з ним блок розрахунку меж зон допустимих курсів маневру розходження, що має зв'язок з індикатором, який має дисплей, блок визначення безпечного маневру розходження зміною курсів, блок індикації одержаних параметрів маневру розходження та блок імітаційного моделювання маневру розходження з вибраними параметрами, який відрізняється тим, що система первинної обробки додатково оснащена блоком розрахунку високоточних значень пеленгу і дистанції методом максимальної правдоподібності, а для оперативного визначення маневру розходження використовується блок розрахунку меж зон допустимих курсів розходження.

(11) 134690

Державне підприємство
«Український інститут інтелектуальної власності»
(Укрпатент)

Оригіналом цього документа є електронний документ з відповідними реквізитами, у тому числі з накладеним електронним цифровим підписом уповноваженої особи Міністерства економічного розвитку і торгівлі України та сформованою позначкою часу.

Ідентифікатор електронного документа 4328220519.

Для отримання оригіналу документа необхідно:

1. Зайти до ІДС «Стан діловодства за заявками на винаходи та корисні моделі», яка розташована на сторінці <http://base.uipv.org/searchInvStat/>.
2. Виконати пошук за номером заявки.
3. У розділі «Документи Укрпатенту» поруч з реєстраційним номером документа натиснути кнопку «Завантажити оригінал» та ввести ідентифікатор електронного документа.

Ідентичний за документарною інформацією та реквізитами паперовий примірник цього документа містить 2 арк., які пронумеровані та прошиті металевими люверсами.

Уповноважена особа Укрпатенту

І.Є. Матусевич

27.05.2019





МІНІСТЕРСТВО
ЕКОНОМІЧНОГО
РОЗВИТКУ І ТОРГІВЛІ
УКРАЇНИ

УКРАЇНА

(19) **UA** (11) **134690** (13) **U**
(51) МПК
G08G 3/02 (2006.01)

(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

(21) Номер заявки: u 2019 00783	(72) Винахідник(и): Ворохобін Ігор Ігорович (UA), Бурмака Ігор Олексійович (UA), П'ятаков Едуард Миколайович (UA)
(22) Дата подання заявки: 25.01.2019	(73) Власник(и): Ворохобін Ігор Ігорович, вул. Махачкалинська, 7-А, кв. 21, м. Одеса, 65111, Україна (UA), Бурмака Ігор Олексійович, вул. Піонерська, 5, коп. 6. кв. 85, м. Одеса, 65009, Україна (UA), П'ятаков Едуард Миколайович, вул. Котовського, 150, м. Херсон, 73013, Україна (UA)
(24) Дата, з якої є чинними права на корисну модель: 27.05.2019	(74) Представник: Шаповалов Руслан Юрійович
(46) Публікація відомостей про видачу патенту: 27.05.2019, Бюл.№ 10	

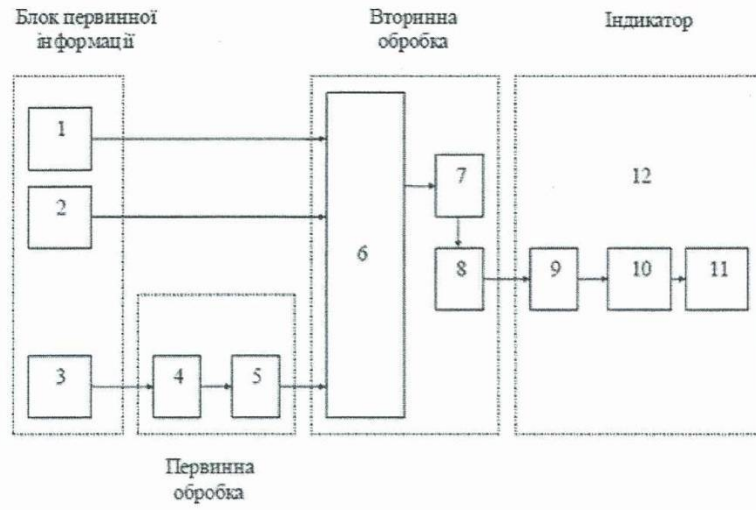
(54) ПРИСТРІЙ ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ВИСОКОТОЧНОГО БЕЗАВАРІЙНОГО РОЗХОДЖЕННЯ СУДЕН

(57) Реферат:

Пристрій для забезпечення високоточного безаварійного розходження суден, що містить систему визначення поточної інформації, яка складається із блока визначення поточного курсу та швидкості власного судна, блока інформації про параметри руху зустрічного судна та блока вимірювання пеленгу та відстані між суднами, які зв'язані з системою первинної обробки, яка включає блок накопичення масиву значень пеленгу і дистанції між суднами та зв'язаний з ним блок розрахунку високоточних значень пеленгу і дистанції, що безпосередньо сполучений із системою вторинної обробки, яка реалізована за допомогою комп'ютера і містить блок оцінки небезпеки ситуації зближення з визначенням рівня ситуативного збурення та з'єднаний з ним блок розрахунку меж зон допускних курсів маневру розходження, що має зв'язок з індикатором, який має дисплей, блок визначення безпечного маневру розходження зміною курсів, блок індикації одержаних параметрів маневру розходження та блок імітаційного моделювання маневру розходження з вибраними параметрами. Система первинної обробки додатково оснащена блоком розрахунку високоточних значень пеленгу і дистанції методом максимальної правдоподібності, а для оперативного визначення маневру розходження використовується блок розрахунку меж зон допускних курсів розходження.

UA 134690 U

UA 134690 U



Корисна модель належить до засобів попередження зіткнення суден і може бути використана як засіб оперативного визначення параметрів маневру розходження судна з небезпечною ціллю.

Найбільш близьким по технічній суті є засіб автоматизованої радіолокаційної проводки, який зв'язаний з радіолокаційною станцією і по одержаній інформації блок визначення параметрів руху цілей виробляє поточну інформацію і передає її на індикатор. Індикатор містить дисплей, блок розрахунку параметрів найкоротшого зближення суден та блок програвання вибраного маневру розходження.

Недоліком зазначеної системи є те, що при визначенні небезпечного зближення судна з ціллю в системі не передбачено вирішення задачі вибору безпечного маневру розходження.

В основу корисної моделі поставлена задача створення пристрою для забезпечення високоточного безаварійного розходження суден шляхом визначення високоточних значень пеленгу та дистанції до цілі, оцінки небезпеки ситуації зближення з визначенням рівня ситуативного збурення і розрахунку меж зон допускних курсів маневру розходження, за допомогою якої визначаються параметри безпечного маневру розходження.

Поставлена задача вирішується тим, що в пристрої для забезпечення високоточного безаварійного розходження суден міститься система визначення поточної інформації, в яку входять блок датчиків для визначення поточного курсу та швидкості власного судна, блок формування інформації про параметри руху зустрічного судна та блок вимірювання поточних значень пеленгу та відстані між суднами. Система первинної обробки зв'язана системою визначення поточної інформації і до її складу входить блок накопичення масиву значень пеленгу і дистанції між суднами та зв'язаному з ним блок розрахунку високоточних значень пеленгу і дистанції, який з'єднаний із системою вторинної обробки. В склад цієї системи входить блок оцінки небезпеки ситуації зближення з визначенням рівня ситуативного збурення, який з'єднаний з блоком розрахунку меж зон допускних курсів маневру розходження, що в свою чергу має зв'язок з індикатором. Система вторинної обробки реалізована з допомогою комп'ютера. В склад індикатора входять дисплей, блок визначення безпечного маневру розходження зміню курсів за допомогою області допустимих курсів, яка виводиться на дисплей. На ньому також виводяться одержані параметри маневру розходження. Індикатор також містить блок імітаційного моделювання маневру розходження з вибраними параметрами.

Причинно-наслідковий зв'язок між сукупністю ознак корисної моделі і технічним результатом, що досягається, полягає у наступному.

Блок розрахунку високоточних значень пеленгу і дистанції забезпечує мінімальний ризик виникнення неконтрольованої ситуації аварійного зближення судна з ціллю. В разі зближення блок оцінки небезпеки ситуації зближення визначає стандартний чи екстремний характер маневру розходження.

Блок визначення безпечного маневру розходження зміню курсів дає змогу судноводію оперативно і своєчасно здійснити маневр попередження зіткнення. Перевірка коректності вибраного маневру можлива з допомогою блока імітаційного моделювання маневру розходження в прискореному масштабі часу.

Суть корисної моделі пояснюється кресленням. На кресленні показана блок-схема пристрою.

Пристрій для забезпечення високоточного безаварійного розходження суден складається із системи визначення поточної інформації, що містить блок визначення поточного курсу та швидкості власного судна 1, блок інформації про параметри руху зустрічного судна 2 та блок вимірювання пеленгу та відстані між суднами 3. Із системою визначення поточної інформації зв'язана система її первинної обробки, яка містить блок накопичення масиву значень пеленгу і дистанції між суднами 4, які вимірюються через рівні проміжки часу, та зв'язаний з ним блоком розрахунку високоточних значень пеленгу і дистанції 5, який безпосередньо сполучений із системою вторинної обробки. Ця система містить блок оцінки небезпеки ситуації зближення 6 з визначенням рівня ситуативного збурення 7 та з'єднаний з ним блок розрахунку меж зон допускних курсів маневру розходження 8, що має зв'язок з індикатором.

Індикатор має дисплей 12, блок визначення безпечного маневру розходження зміню курсів 9 за допомогою меж допускних курсів, яка виводиться на дисплей. На дисплеї також проводиться індикація одержаних параметрів маневру розходження 12. В склад індикатора також входить блок імітаційного моделювання маневру розходження 11 з вибраними параметрами.

Пристрій для забезпечення високоточного безаварійного розходження суден працює наступним чином:

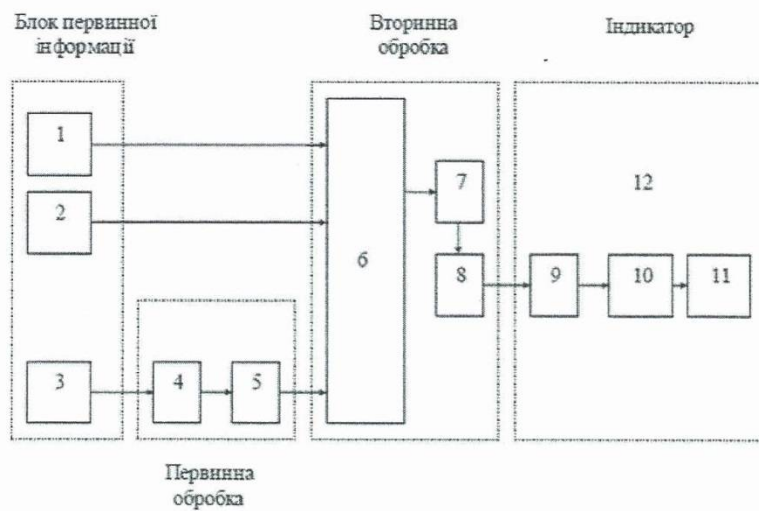
UA 134690 U

- Блок 1 визначає за допомогою гірокомпасу курс і швидкість власного судна, одночасно блок 2, використовуючи АІС, формує інформацію про параметри руху зустрічного судна. В блоці 3 за допомогою ЗАРП вимірюються дистанції та пеленги на зустрічне судно, які накопичуються в блоці 4. Після накопичення достатнього об'єму дані обробляються блоком 5, і високоточне відносне положення суден подається на блок вторинної обробки в блок 6 оцінки небезпеки ситуації зближення, куди потрапляє інформація з блоків 1 і 2. Блок 6 розраховує високоточне значення дистанції найкоротшого зближення, по значенню якого визначається наявність ситуації небезпечного зближення, а також її рівень небезпеки розраховується в блоці 7. Залежно від рівня небезпеки ситуації зближення використовується маневр екстреного розходження, або блок 8 розраховує межі області допустимих курсів маневру розходження і передає їх в індикатор на блок 9, який формує графічне відображення області допустимих курсів і забезпечує оперативне визначення безпечного маневру розходження зміною курсів.
- Одержані параметри маневру розходження виводяться блоком 10 судноводієві для попередження зіткнення, а також надходять на блок 11 для імітаційного моделювання маневру розходження.
- Застосування даного пристрою дозволить судноводію здійснювати безперервний контроль навігаційної ситуації в частині наявності небезпечних зближень з іншими суднами і в разі необхідності оперативно визначати параметри маневру розходження, уникаючи можливого зіткнення. Для перевірки безпечності маневру передбачено його програвання в прискореному масштабі часу.

ФОРМУЛА КОРИСНОЇ МОДЕЛІ

- Пристрій для забезпечення високоточного безаварійного розходження суден, що містить систему визначення поточної інформації, яка складається із блока визначення поточного курсу та швидкості власного судна, блока інформації про параметри руху зустрічного судна та блока вимірювання пеленгу та відстані між суднами, які зв'язані з системою первинної обробки, яка включає блок накопичення масиву значень пеленгу і дистанції між суднами та зв'язаний з ним блок розрахунку високоточних значень пеленгу і дистанції, що безпосередньо сполучений із системою вторинної обробки, яка реалізована за допомогою комп'ютера і містить блок оцінки небезпеки ситуації зближення з визначенням рівня ситуативного збурення та з'єднаний з ним блок розрахунку меж зон допускних курсів маневру розходження, що має зв'язок з індикатором, який має дисплей, блок визначення безпечного маневру розходження зміною курсів, блок індикації одержаних параметрів маневру розходження та блок імітаційного моделювання маневру розходження з вибраними параметрами, який відрізняється тим, що система первинної обробки додатково оснащена блоком розрахунку високоточних значень пеленгу і дистанції методом максимальної правдоподібності, а для оперативного визначення маневру розходження використовується блок розрахунку меж зон допускних курсів розходження.

UA 134690 U



Комп'ютерна верстка В. Юкін

Міністерство економічного розвитку і торгівлі України, вул. М. Грушевського, 12/2, м. Київ, 01008, Україна

ДП "Український інститут інтелектуальної власності", вул. Глазунова, 1, м. Київ – 42, 01601
